



**Universidad Autónoma de San Luis Potosí**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Centro de Investigación y Estudios de Posgrado**

**Modelación hidrodinámica para la identificación de zonas  
de inundación ante diferentes escenarios climáticos sobre  
el río Sinú, tramo Montería, Colombia**

**T E S I S**

Que para obtener el grado de:

**Maestro en Tecnología y Gestión del Agua**

Presenta:

**Ing. Carlos Eduardo Ontiveros Curiel**

Asesor:

**Dr. Clemente Rodríguez Cuevas**

Co - asesor:

**Dr. Franklin Manuel Torres Bejarano**

San Luis Potosí, S. L. P.

Octubre de 2021





**Universidad Autónoma de San Luis Potosí**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Centro de Investigación y Estudios de Posgrado**

**Modelación hidrodinámica para la identificación de zonas  
de inundación ante diferentes escenarios climáticos sobre  
el río Sinú, tramo Montería, Colombia**

**T E S I S**

Que para obtener el grado de:  
**Maestro en Tecnología y Gestión del Agua**

Presenta:  
**Ing. Carlos Eduardo Ontiveros Curiel**

Asesor:  
**Dr. Clemente Rodríguez Cuevas**

Co - asesor:  
**Dr. Franklin Manuel Torres Bejarano**

Subcomité de tesis  
**Dr. Hermann Rocha Escalante**  
**Dr. Abraham Cárdenas Tristán**

San Luis Potosí, S. L. P.

Octubre de 2021



20 de mayo de 2021

**ING. CARLOS EDUARDO ONTIVEROS CUIEL  
P R E S E N T E.**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por los **Dres. Clemente Rodríguez Cuevas y Franklin Manuel Torres Bejarano**, *Asesor y Coasesor de la Tesis* que desarrollará Usted, con el objeto de obtener el Grado de **Maestro en Tecnología y Gestión del Agua**. Me es grato comunicarle que en la sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 20 de mayo del presente, fue aprobado el Temario propuesto:

**TEMARIO:**

**"Modelación hidrodinámica para la identificación de zonas de inundación ante diferentes escenarios climáticos sobre el río Sinú, tramo Montería, Colombia"**

- Introducción.
1. Fenómenos hidrometeorológicos, causas y efectos
  2. Descripción del área de estudio
  3. Estudio hidrológico de la cuenca del río Sinú
  4. Topobatimetría del tramo de estudio
  5. Modelación numérica del río Sinú
  6. Resultados y discusión
- Conclusiones.  
Referencias.

**"MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO"**

**A T E N T A M E N T E**



**DR. EMILIO JORGE GONZÁLEZ GALVÁN**  
**DIRECTOR.**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
DE SAN LUIS POTOSÍ  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIRECCIÓN

## **AGRADECIMIENTOS**

A la **Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP)**, y el **Centro de Investigación y Estudios de Posgrado (CIEP)**, por la oportunidad de realizar mis estudios de posgrado dentro de su programa educativo.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT)**, por la confianza brindada para ser becario, y el apoyo económico durante los dos años de maestría.

A la **Universidad de Córdoba, Colombia, Departamento de Ingeniería Ambiental**, por darme la oportunidad de realizar una estancia académica para el desarrollo de mi trabajo de tesis, y proporcionarme hospedaje para llevar a cabo mi proyecto.

A mi director de tesis, el **Dr. Clemente Rodríguez Cuevas**, por darme la oportunidad de trabajar bajo su dirección, por su apoyo incondicional, asesoría y conocimientos brindados durante el desarrollo de este trabajo.

A mi co-asesor **Dr. Franklin Manuel Torres Bejarano**, por sus gestiones para desarrollar trabajo de campo en Colombia, darme su asesoría, amistad, y estar al pendiente.

A mi subcomité de tesis, el **Dr. Hermann Rocha Escalante** y el **Dr. Abraham Cárdenas Tristán**, por darme su asesoría y consejo para el desarrollo de mi proyecto.

A **mi familia**, que me apoyaron a lo largo de la carrera, motivándome para luchar por los sueños y cumplir mis metas.

A **José Alejandrez, José Solís, Katya Onchi y Mónica Verdugo** por su amistad, conocimientos, experiencias, y hacer soportable la estancia en tiempos de pandemia.

A **Daniela Romano**, por darme su apoyo, amor, motivación y confianza en todo momento.

# ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN .....	13
Problemática.....	14
Justificación .....	16
Ubicación de la zona de estudio .....	17
Objetivos generales .....	19
Objetivos específico .....	19
1. FENÓMENOS HIDROMETEOROLÓGICOS, CAUSAS Y EFECTOS.....	21
1.1. Ciclones .....	22
1.2. Sequias .....	23
1.3. Inundaciones .....	25
1.3.1. Clasificación de las inundaciones .....	26
1.3.2. Inundaciones según su origen .....	26
1.3.3. Inundaciones según el tiempo en presentarse sus efectos .....	28
1.3.4. Mitigación de daños por inundaciones .....	29
1.3.4.1. Medidas estructurales .....	29
1.3.4.2. Medidas no estructurales .....	30
1.4. Variabilidad climática.....	31
1.4.1. Eventos climáticos extremos .....	33
1.4.2. Fenómeno de El Niño Oscilación del Sur (ENOS) .....	34
1.4.3. Fenómeno de El Niño .....	36
1.4.4. Fenómeno de La Niña .....	37
1.4.5. Variabilidad interanual de la precipitación en Colombia .....	38
1.5. Cambio climático .....	39
1.5.1. Evidencia del cambio climático .....	40
1.6. Peligro .....	42
1.7. Vulnerabilidad.....	43
1.8. Riesgo .....	45
1.9. Gestión del riesgo.....	47
2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	51
2.1. Cuenca del río Sinú .....	51
2.2. Zona de estudio.....	53
2.3. Hidrografía.....	54

2.4.	Precipitación.....	56
2.5.	Temperatura.....	58
2.6.	Uso de suelo .....	59
2.7.	Edafología .....	60
2.8.	Estudios previos .....	62
3.	ESTUDIO HIDROLÓGICO DE LA CUENCA DEL RÍO SINÚ .....	65
3.1.	Ciclo hidrológico .....	65
3.2.	Cuenca hidrográfica .....	66
3.3.	Geomorfología de la cuenca.....	67
3.3.1.	Delimitación de parteaguas .....	67
3.3.2.	Tamaño y tipo de cuenca .....	68
3.3.3.	Coeficiente de compacidad.....	69
3.3.4.	Curva hipsométrica.....	70
3.3.5.	Elevación mediana .....	71
3.3.6.	Pendiente de la cuenca .....	72
3.3.7.	Relación de elongación .....	72
3.4.	Geomorfología de los cauces .....	73
3.4.1.	Red de drenaje.....	73
3.4.2.	Orden de corrientes.....	74
3.4.3.	Densidad de drenaje.....	74
3.4.4.	Pendiente el cauce principal .....	75
3.4.5.	Método simplificado.....	75
3.4.6.	Método de reducción de porcentajes .....	76
3.4.7.	Método de Taylor y H.E. Schwarz.....	77
3.5.	Parámetros hidrológicos de la cuenca .....	78
3.5.1.	Numero de escurrimiento .....	79
3.5.2.	Tiempo de concentración .....	83
3.6.	Estimación de la precipitación sobre la cuenca .....	84
3.6.1.	Precipitaciones máximas en 24 horas .....	84
3.6.2.	Estimación de datos faltantes .....	87
3.6.3.	Serie anual de máximos .....	88
3.6.4.	Distribuciones de probabilidad.....	89
3.6.5.	Lluvia de diseño en la cuenca.....	92
3.6.6.	Lluvia en exceso.....	93

3.6.7.	Curvas I-D-TR .....	94
3.7.	Métodos semiempíricos para estimar caudales .....	98
3.7.1.	Método racional .....	98
3.7.2.	Método del Hidrograma Unitario Triangular .....	99
3.7.3.	Método de Ven Te Chow .....	100
3.7.4.	Método del Hidrograma Unitario de Snyder .....	101
3.8.	Caudales de diseño para el análisis de inundaciones.....	104
4.	TOPOBATIMETRÍA DEL TRAMO DE ESTUDIO.....	106
4.1.	Topografía.....	106
4.1.1.	Levantamiento topográfico.....	107
4.1.2.	Tipos de levantamiento topográfico .....	107
4.1.3.	Proyección cartográfica .....	108
4.1.4.	Sistemas mundiales de navegación por satélite (GNSS) .....	110
4.1.5.	Sensores remotos .....	111
4.1.6.	Sensores activos .....	112
4.1.7.	Sensores pasivos .....	112
4.1.8.	Modelos digitales de elevación .....	113
4.1.9.	Modelo digital de superficie (MDS) .....	114
4.1.10.	Modelo digital de terreno (MDT) .....	114
4.1.11.	Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) .....	115
4.1.12.	ALOS PALSAR.....	117
4.2.	Batimetría.....	119
4.2.1.	Métodos topográficos en batimetría.....	120
4.2.2.	Método de posicionamiento planimétrico .....	120
4.2.3.	Métodos de posicionamiento altimétrico .....	121
4.2.4.	Campañas de medición batimétrica .....	122
4.2.5.	Metodología de trabajo .....	122
4.2.6.	Equipo de trabajo .....	123
4.2.7.	Elaboración del plan de trabajo .....	125
4.2.8.	Trabajo de campo.....	127
4.2.9.	Batimetría del río Sinú .....	130
4.3.	Topobatimetría .....	131
4.3.1.	Proceso de interpolación .....	132
4.3.2.	Metodología de trabajo .....	133

4.3.3. Topobatemetría del río Sinú, tramo Montería.....	138
5. MODELACIÓN NUMÉRICA DEL RÍO SINÚ .....	139
5.1. Ecuaciones gobernantes .....	139
5.2. Tipos de modelos numéricos.....	146
5.3. Proceso de la modelación numérica.....	147
5.4. Modelos numéricos para el análisis hidráulico.....	150
5.5. Softwares para modelación numérica de flujo .....	152
5.6. Protocolo para la selección del modelo numérico.....	153
5.7. Environmental Fluid Dynamics Code (EFDC Explorer).....	154
5.8. Implementación del modelo EFDC Explorer .....	155
5.8.1. Discretización del dominio .....	156
5.8.2. Condiciones iniciales .....	157
5.8.3. Condiciones de frontera.....	161
5.8.4. Tiempo de simulación.....	163
5.8.5. Hidrodinámica.....	164
5.9. Calibración del modelo .....	166
5.10. Validación del modelo .....	170
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	172
6.1. Resultados de la calibración del modelo.....	172
6.2. Resultados de la validación del modelo.....	173
6.3. Resultado de simulación del río Sinú.....	176
6.3.1. Simulaciones para un $Tr= 2$ años .....	176
6.3.2. Simulaciones para un $Tr= 3$ años .....	178
6.3.3. Simulaciones para un $Tr= 4$ años .....	179
6.3.4. Simulaciones para un $Tr= 5$ años .....	181
6.3.5. Simulaciones para un $Tr= 10$ años .....	183
6.4. Mapa de zonificación de amenaza por inundación .....	185
6.5. Propuestas de solución .....	187
CONCLUSIONES .....	191
REFERENCIAS .....	194



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Desbordamiento del río Sinú - Ronda Norte (Fuente: Diario La Piragua, 2010).	14
Figura 2. Afectación de zonas agrícolas por creciente del río Sinú (Fuente: RCN Radio, 2017).....	16
Figura 3. Macrolocalización de la zona de estudio.....	18
Figura 4. Localización de la zona de estudio.....	19
Figura 5. Regiones de formación de ciclones con el promedio de trayectoria (Fuente: NOAA, 2013). .....	23
Figura 6. Mapa de anomalías de las temperaturas de superficie del océano pacífico durante fuertes episodios de La Niña y El Niño (OMM, 2014). .....	35
Figura 7. Representación de las condiciones océano atmosféricas del pacífico, durante los períodos normales y de ocurrencia de los fenómenos El Niño (Fuente: NOAA/PMEL/TAO Project, USA). .....	36
Figura 8. Anomalías en la precipitación invierno/verano, durante un evento La Niña (Fuente: OMM, 2014) .....	37
Figura 9. La gestión del riesgo y su clasificación. Fuente: PNUD, 2012 .....	48
Figura 10. Macrolocalización de la zona de estudio.....	51
Figura 11. Macrolocalización de la cuenca de estudio.....	52
Figura 12. Localización de la cuenca de estudio.....	53
Figura 13. Tramo de estudio sobre el área urbana de Montería, Depto. de Córdoba, Colombia.....	54
Figura 14. Hidrografía de la cuenca del río Sinú. (Fuente: Elaboración propia).....	55
Figura 15. Ubicación espacial de las estaciones pluviométricas analizadas (Fuente: DEAM) .....	56
Figura 16. Precipitación máxima en 24 horas - Estación Universidad de Córdoba.....	57
Figura 17. Temperatura media máxima para Estación Universidad de Córdoba. ....	58
Figura 18. Cobertura de suelo de la zona de estudio.....	59
Figura 19. Edafología de la zona de estudio. ....	60
Figura 20. Representación descriptiva del ciclo hidrológico (W. C. Ackermann, E. A. Coleman, 1955) .....	66
Figura 21. Delimitación de la cuenca del río Sinú. ....	67
Figura 22. Análisis hipsométrico en función del tipo de cuenca y su ciclo erosivo.....	70
Figura 23. Curva hipsométrica de la cuenca del río Sinú.....	71

Figura 24. Elevación mediana de la cuenca del río Sinú. ....	71
Figura 25. Red de drenaje y cauce principal. ....	73
Figura 26. Perfil del cauce principal del río Sinú. ....	78
Figura 27. Curvas I-D-TR de la zona de estudio. ....	97
Figura 28. Hidrograma unitario de Snyder para diferentes periodos de retorno. ....	104
Figura 29. Proyección cartográfica de la Tierra mediante para generar un mapa ....	109
Figura 30. Modelo digital de elevación descargado de la base de datos SRTM, resolución de 30 metros.....	116
Figura 31. Modelo digital de elevación, base de datos ALOS PALSAR, resolución de 12.5 metros. ....	118
Figura 32. Embarcación utilizada en las campañas de medición sobre el río Sinú.....	123
Figura 33. Batería de 12 volts utilizada para conectar la ecosonda. ....	124
Figura 34. Ecosonda Garmin Echomap 73 SV.....	124
Figura 35. GPS GARMIN GPSMAP 60CSX.....	125
Figura 36. Recorrido proyectado para la campaña de medición sobre el río Sinú. ....	126
Figura 37. Registro de profundidades en márgenes del río Sinú.....	127
Figura 38. Obras de toma y descarga sobre el río Sinú.....	128
Figura 39. Estructuras de cruce sobre el río Sinú. ....	128
Figura 40. Actividades de extracción sobre el río Sinú. ....	129
Figura 41. Obras de protección sobre el río Sinú.....	129
Figura 42. Levantamiento batimétrico del río Sinú. ....	130
Figura 43. Representación topobatimétrica del río Tampaón, S.L.P., (Fuente: Rodríguez-Cuevas <i>et al.</i> , 2019) .....	131
Figura 44. Datos altimétricos del MDE ALOS PALSAR, resolución 12.5 metros. ....	133
Figura 45. Nube de puntos formada a partir del MDE ALOS PALSAR, sobre la ciudad de Montería, Colombia. ....	134
Figura 46. Digitalización y extracción de puntos sobre la zona del cauce.....	135
Figura 47. Unión de datos topográficos y batimétricos de la zona de estudio. ....	135
Figura 48. Modelo digital de elevación corregido, representa la topobatimetría de la zona de estudio. ....	136
Figura 49. Curvas de nivel a 1 metro sobre la zona urbana de Montería, Colombia. ....	137
Figura 50. Topobatimetría de la zona de estudio. ....	138
Figura 51. Escala temporal de la modelación dinámica del agua. ....	146

Figura 52. Elementos que intervienen en la modelación.....	148
Figura 53. Malla de modelo hidrodinámico del río Sinú. ....	156
Figura 54. Malla del modelo sobre el cauce y zona urbana. ....	157
Figura 55. Interfaz del EFDC Explorer para asignar condiciones iniciales. ....	158
Figura 56. Topobatemetría asignada a la malla del modelo EFDC Explorer. ....	159
Figura 57. Condiciones iniciales de la superficie del agua sobre el río Sinú. ....	159
Figura 58. Rugosidad asignada al modelo EFDC Explorer. ....	160
Figura 59. Asignación de entrada de flujo sobre el río Sinú (Sobre cuadro rojo se localiza entrada de flujo). ....	161
Figura 60. Asignación de salida de flujo sobre el río Sinú (Sobre cuadro rojo se localiza salida de flujo). ....	162
Figura 61. Asignación de condiciones frontera sobre el contorno de la malla. ....	163
Figura 62. Interfaz del EFDC Explorer para definir el tiempo de simulación. ....	164
Figura 63. Interfaz de usuario para definir la hidrodinámica del modelo. ....	165
Figura 64. Topobatemetría del río Sinú, sin corrección topobatimétrica. ....	166
Figura 65. Topobatemetría del río Sinú, con corrección topobatimétrica. ....	167
Figura 66. Ubicación de la estación limnigráfica Montería. ....	168
Figura 67. Nivel medio diario registrado en la estación Montería, Mayo 2020. ....	169
Figura 68. Comparación de nivel medio diario medidos en campo y simulados, Mayo 2020. ....	172
Figura 69. Comparación de nivel medio diario medidos en campo y simulados, junio 2020. ....	173
Figura 70. Afectaciones por lluvias intensas en zona urbana de Montería, Colombia, 23 de agosto 2021. ....	174
Figura 71. Resultado de simulación para evento de desbordamiento sobre el río Sinú, 23 de agosto de 2021. ....	175
Figura 72. Resultado de simulación del río Sinú, Tr= 2 años, Q= 887.75 m <sup>3</sup> /s. ....	177
Figura 73. Resultado de velocidades del río Sinú, Tr= 2 años, Q= 887.75 m <sup>3</sup> /s. ....	177
Figura 74. Resultado de simulación del río Sinú, Tr= 3 años, Q= 977.93 m <sup>3</sup> /s. ....	178
Figura 75. Resultado de velocidades sobre el río Sinú, Tr= 3 años, Q= 977.93 m <sup>3</sup> /s. ....	179
Figura 76. Resultado de simulación del río Sinú, Tr= 4 años, Q= 1079.12 m <sup>3</sup> /s. ....	180
Figura 77. Resultado de velocidades sobre el río Sinú, Tr= 4 años, Q= 1079.12 m <sup>3</sup> /s. ...	181
Figura 78. Resultado de simulación del río Sinú, Tr= 5 años, Q= 1195.98 m <sup>3</sup> /s. ....	182

Figura 79. Resultado de velocidades sobre el río Sinú, Tr= 5 años, Q= 1195.98 m <sup>3</sup> /s. ...	183
Figura 80. Resultado de simulación del río Sinú, Tr= 10 años, Q= 1398.66 m <sup>3</sup> /s.....	184
Figura 81. Resultado de velocidades sobre el río Sinú, Tr= 10 años, Q= 1398.66 m <sup>3</sup> /s. ....	184
Figura 82. Mapa de zonificación de amenaza por inundación, Tr= 5 años. ....	186
Figura 83. Mapa de zonificación de amenaza por inundación, Tr= 10 años. ....	187
Figura 84. Propuestas de obras de protección marginal sobre el río Sinú, tramo Montería, Colombia.....	189

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Descripción del tipo de suelo sobre la cuenca de estudio. ....	61
Tabla 2. Área y perímetro de la cuenca de estudio. ....	68
Tabla 3. Clasificación de las cuencas (Campos Aranda, 1992). ....	68
Tabla 4. Clasificación de la cuenca de acuerdo con el coeficiente de compacidad ..... 69	69
Tabla 5. Índice de compacidad para la cuenca de estudio. ....	69
Tabla 6. Clasificación del relieve en función de pendiente (R. Heras R.) ..... 76	76
Tabla 7. Cálculo para determinar la pendiente de Taylor - Schwarz ..... 77	77
Tabla 8. Ponderación del número de escurrimiento N. Continuación. ....	80
Tabla 9. Métodos de cálculo para determinar el tiempo de concentración..... 84	84
Tabla 10. Estaciones pluviométricas utilizadas para el análisis hidrológico. ....	84
Tabla 11. Precipitación máxima en 24 horas multianual por estación pluviométrica (1/2). 85	85
Tabla 12. Precipitación máxima en 24 horas multianual por estación pluviométrica (2/2). 86	86
Tabla 13. Precipitación máxima en 24 horas anuales desde 1970 a 2020. ....	89
Tabla 14. Ponderación de extrapolación de lluvias máximas anuales..... 91	91
Tabla 15. Valores recomendados para el parámetro (e) en la ecuación de Kuischling. .... 92	92
Tabla 16. Lluvia de diseño en la cuenca del río Sinú. ....	92
Tabla 17. Lluvia en exceso (He) en la cuenca para diferentes periodos de retorno. .... 93	93
Tabla 18. Precipitaciones convertidas a 24 horas. ....	95
Tabla 19. Cociente entre la lluvia de 1 hora y la de 24 horas. ....	95
Tabla 20. Valores de intensidad de la lluvia para 60 minutos ..... 96	96
Tabla 21. Valores de los parámetros R y F para la cuenca ..... 96	96
Tabla 22. Variables a, b, c del método de Cheng..... 97	97
Tabla 23. Valores obtenidos aplicando el método de Cheng ..... 97	97
Tabla 24. Caudales máximos estimados por el método racional..... 99	99
Tabla 25. Caudales máximos estimados por el método hidrograma unitario triangular... 100	100
Tabla 26. Caudales máximos estimados por el método de Ven Te Chow ..... 101	101
Tabla 27. Caudales máximos estimados por el método de Snyder..... 103	103
Tabla 28. Caudales máximos seleccionados para el análisis de inundaciones. .... 105	105
Tabla 29. Softwares utilizados para la modelación numérica, libres y comerciales. .... 152	152
Tabla 30. Valores de rugosidad asignados sobre el modelo. ....	160
Tabla 31. Valores referenciales del Criterio de Nash-Sutcliffe (Molnar, 2011) ..... 170	170
Tabla 32. Categorización simplificada de la amenaza, metodología de la FEMA..... 185	185

## INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso natural, económico y estratégico para el desarrollo del ser humano, los seres vivos, los asentamientos humanos y las actividades económicas, se considera esencial, por los servicios ambientales que presta para el abastecimiento, uso del agua potable, y algunas actividades productivas, como la agricultura y la industria (Díaz-Pulido *et al.*, 2009). Los peligros naturales relacionados con el agua como las inundaciones y las sequías, pueden perjudicar a las infraestructuras de suministro de agua y saneamiento, impidiendo el abastecimiento a millones de personas (UNESCO, 2019).

Las inundaciones son fenómenos naturales y recurrentes que hacen parte de la dinámica propia de los cuerpos de agua, sin embargo, el desarrollo de sistemas agrícolas, la urbanización y, en general, la modificación de las dinámicas propias de los ríos, ha convertido a las inundaciones en problemas, debido a las pérdidas físicas, humanas y económicas (IDEAM, 2019).

A nivel global, alrededor del 90% de todos los desastres naturales están relacionados con el agua. En el período 1995–2015, las inundaciones representaron el 43% de todos los desastres naturales documentados, afectando a 2,300 millones de personas, quitando la vida a 157,000 más, causando daños por 662,000 millones de dólares (UNESCO, 2019).

Una herramienta muy útil para predecir las inundaciones son los modelos numéricos, estos permiten predecir el comportamiento de sistemas físicos y obtener un conocimiento cuantitativo de los procesos físicos en general, y de flujos hidrodinámicos en particular. Algunas de las aplicaciones de los modelos numéricos son las usadas para el análisis de escenarios hidrometeorológicos extremos, con el fin de poder implementar acciones de prevención y control ante la presencia de desbordamientos, analizar las llanuras de inundación, así como revisar y diseñar la infraestructura hidráulica (Hidalgo & Martínez-Cantó, 2017).

En el presente proyecto, se busca identificar zonas de inundación ante diferentes escenarios climáticos sobre el río Sinú, sobre el tramo Montería, Colombia, sin

embargo, se abordan los escenarios climáticos como un evento recursivo en el tiempo denominado periodo de retorno, asociado a datos que solicitan las autoridades para la construcción de obras civiles que permiten el control de las inundaciones.

## **Problemática**

Colombia es un país en el que los fenómenos hidrometeorológicos son frecuentes y abundantes, ocasionando lluvias intensas y extraordinarias con un alto grado de problemas relacionados con las inundaciones, estas generan un gran número de afectaciones económicas, sociales, ambientales y de salud. De acuerdo con el Sistema de Inventario de Desastres (DesInventar), desarrollado por de la Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina (LA RED), se puede concluir que las inundaciones han ocasionado el 43 % de las viviendas destruidas y el 10 % de las pérdidas de vidas en Colombia, entre los años 1970 al 2011 (Corporación OSSO - EAFIT, 2011).

En el año 2010, dentro del Municipio de Montería, Departamento de Córdoba, Colombia, se presentaron afectaciones por las altas precipitaciones, las cuales provocaron inundaciones en zonas urbanas y rurales.



*Figura 1. Desbordamiento del río Sinú - Ronda Norte (Fuente: Diario La Piragua, 2010)*

La Ronda del Sinú son parques lineales, ubicados en los márgenes del río Sinú, dentro de la zona urbana de Montería, Colombia, en el margen derecho se encuentra la Ronda del Sinú, Zona Centro, y la Ronda del Sinú Norte, mientras que, sobre el margen izquierdo se ubica la Ronda del Sinú de Occidente. La Ronda del Sinú, representan sitios de atracción turística y recreación, y funcionan como rondas hídricas, que de acuerdo con el Decreto 2245 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, buscan la protección, conservación y directrices de manejo ambiental sobre áreas paralelas a los cauces permanentes de ríos y lagos, hasta de treinta metros de ancho. Estos parques sufren la presencia de inundaciones de manera recurrente, cuando se observa un incremento en el nivel del agua son los primeros sitios donde se visualizan las inundaciones, sin embargo, su diseño permite eliminar el agua de manera natural cuando baja el nivel del río y proteger los márgenes de las zonas urbana, recibiendo el primer impacto de los desbordamientos (Figura 1).

El río Sinú, objeto de este estudio se ha desbordado de manera recurrente, ocasionando problemas socioeconómicos para la región. Se tiene registro que, durante el año 1988, las pérdidas materiales ascendieron a la suma de 6 millones 837 mil dólares estadounidenses. La inundación más severa, registrada en la cuenca hidrográfica del río Sinú fue en el año 1963, para ese evento la estación de Angostura registró un caudal máximo de 2,643 m<sup>3</sup>/s (CVS, 2018).

Las inundaciones en el río Sinú se han presentado de manera natural con una ocurrencia cada 10 años, pero debido al aumento en los cambios en el uso de suelo, deforestaciones y el crecimiento de las zonas urbanas, desde el año 2007, se tiene una reincidencia anual, llegando a presentar afectaciones sobre zonas de producción agrícolas y urbanas colindantes al cauce. A partir del aumento de los eventos climáticos extremos, se presenta un aumento en las precipitaciones de toda la cuenca, lo que genera afectaciones directas a una población aproximada de 250,000 personas, sus sistemas productivos, infraestructura pública y vivienda (CVS, 2018).



Para tener un mayor conocimiento de la incidencia de las inundaciones ribereñas sobre las zonas urbanas, se realiza una medición en campo de las condiciones actuales del cauce, recopilando información hidrometeorológica, permitiendo pronosticar el cambio climático con base en diferentes escenarios climáticos y estimar gastos asociados a diferentes periodos de retorno, correlacionándolo con el análisis de avenidas máximas.

## **Justificación**

Debido al aumento en las precipitaciones, existe una amenaza latente por las inundaciones, que puede entenderse como la probabilidad de ocurrencia de desbordamientos de ríos, como resultado de lluvias fuertes o continuas que aumentan el nivel de las aguas, a tal punto que, el río se sale del cauce natural en un período determinado, desbordando y causando afectaciones hacia la población, el sector agropecuario y la infraestructura civil (PREDECAN, 2009).

El incremento de las precipitaciones, en conjunto con la poca planificación en el ordenamiento territorial y el aumento de la intervención del hombre sobre el zonas de protección forestal, acompañado de acciones, como la desecación de humedales y ciénagas, la pérdida de bosques y cobertura vegetal, provocan en términos de erosión y aumento de escorrentías, mayor susceptibilidad ante deslizamientos, inundaciones y avenidas torrenciales en zonas que antes no lo eran (Figura 2) (Campos *et al.*, 2012).



*Figura 2. Afectación de zonas agrícolas por creciente del río Sinú (Fuente: RCN Radio, 2017)*

En Colombia, de forma acumulativa, durante los últimos 40 años, los desastres han ocasionado pérdidas que alcanzan los 7.100 millones de dólares estadounidense, es decir, un promedio de pérdidas anuales de 177 millones dólares estadounidenses (Campos *et al.*, 2012).

Por la importancia de las afectaciones ante lluvias intensas, se recurre al estudio de las inundaciones, que busca identificar las zonas donde puede ocurrir el evento, establecer los periodos de ocurrencia y determinar el grado de afectación probable de los elementos expuestos; esto, con el fin de conocer el nivel de riesgo de un territorio determinado, y gestionar acciones para la prevención y la preparación de la respuesta frente la materialización del mismo (IDEAM, 2019).

Para determinar con precisión las inundaciones, se requiere estimar los caudales que pueden presentarse sobre la zona de estudio, contar con información topobatimétrica precisa, utilizar un modelo numérico para simular el comportamiento del cauce, frente a diferentes condiciones hidrológicas e identificar zonas susceptibles a inundarse para elaborar mapas de zonas de inundación y/o mapas de riesgo ante inundaciones (IDEAM, 2017).

Como medida de prevención y conservación ante la presencia de amenazas, dentro del Plan de Acciones de la Política Nacional de Cambio Climático de Colombia, se desarrollan estrategias dentro de sus líneas de acción para el manejo y conservación de los ecosistemas, y sus servicios ecosistémicos, donde se incluye el delimitar las áreas probables de inundación, afectadas por sequía o por elevación del nivel del mar, de acuerdo con distintos escenarios climáticos, y clasificar las zonas de amenaza de acuerdo con el nivel de exposición de las áreas productivas, infraestructura, vivienda y población (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

### **Ubicación de la zona de estudio**

La cuenca hidrográfica del río Sinú se ubica en el sector occidental de la Costa Atlántica Colombiana, es una de las cuencas más representativas de Colombia y representa un aporte importante del recurso hídrico, para satisfacer las necesidades

de la región, tiene una extensión de 1,395,244 hectáreas de las cuales el 93% corresponde al departamento de Córdoba; el 6% a Antioquia y el 1 % al departamento de Sucre.

El río Sinú tiene una longitud total de 437.97 km, desde su nacimiento hasta su desembocadura, mientras que, la longitud del cauce correspondiente a la cuenca de estudio tiene una longitud de 173.52 km, desde la presa Urrá hasta la boquilla de la cuenca ubicada en la zona urbana de Montería (Figura 3).

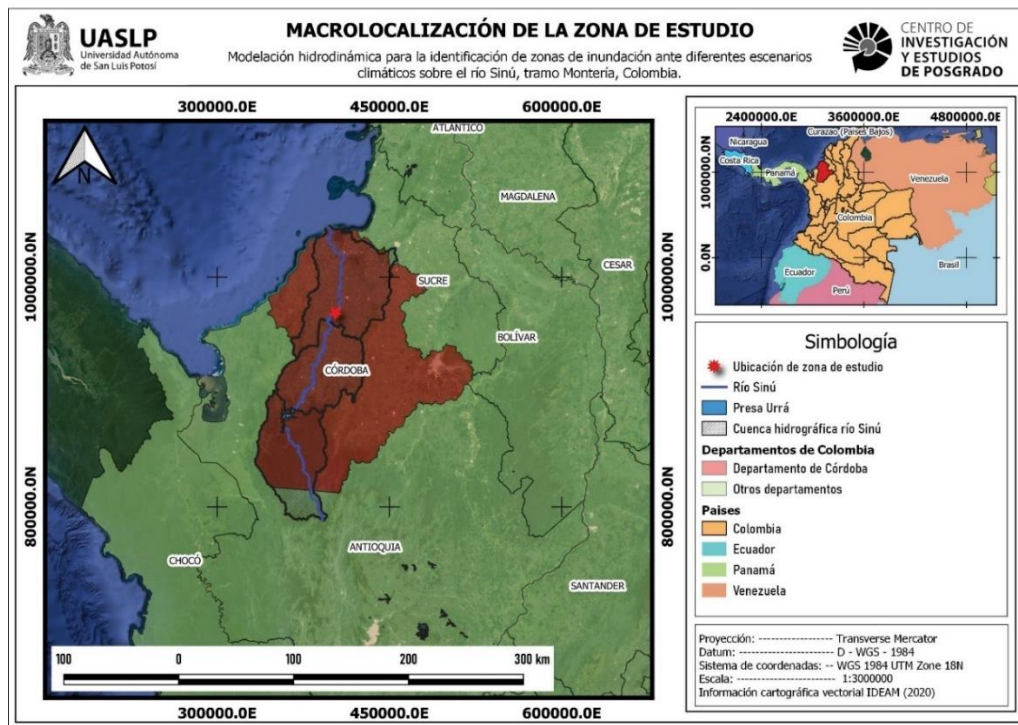


Figura 3. Macrolocalización de la zona de estudio.

El río nace en el área del páramo del Nudo de Paramillo, en el municipio de Ituango, Departamento de Antioquia en la cota 3700 m.s.n.m., cruza el municipio de Ituango, llega a la Presa Urrá, pasa a través de la ciudad de Tierralta, Valencia, la zona urbana de Montería, Cereté, San Pelayo, Lorica, hasta su desembocadura directamente en la zona del delta de Tinajones, en el municipio de San Bernardo del Viento.

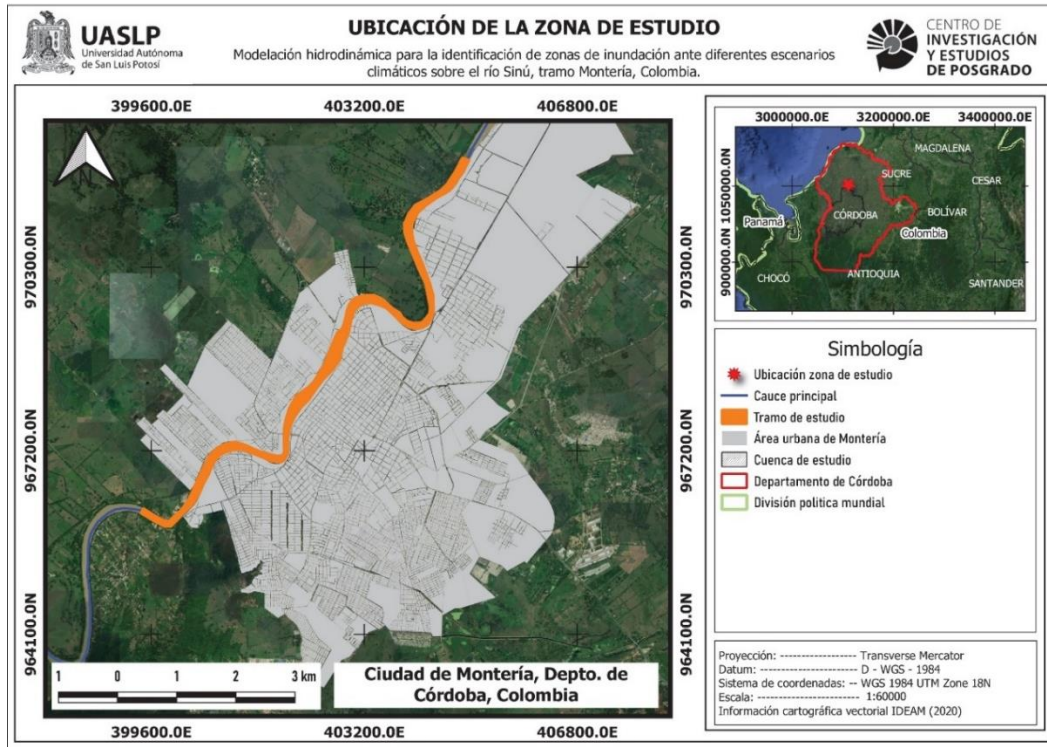


Figura 4. Localización de la zona de estudio.

El tramo de estudio sobre el río Sinú tiene una longitud de aproximadamente 11 km, atraviesa la zona urbana de Montería, Departamento de Córdoba, Colombia, y se extiende sobre los márgenes del cauce para visualizar las áreas susceptibles a inundarse dentro de la zona urbana (Figura 4).

## Objetivos generales

Determinar las zonas susceptibles de inundación sobre el área urbana del río Sinú, tramo Montería, Colombia, causadas por eventos hidrometeorológicos asociados a anomalías climáticas actuales, mediante la implementación de un modelo hidrodinámico.

## Objetivos específico

- Analizar las características geomorfológicas y climatológicas de la cuenca, para determinar el comportamiento hidrológico del río Sinú, mediante el análisis de información temporal y espacial.

- Validar el modelo hidrodinámico, mediante el uso de datos hidrometeorológicos históricos medidos, e información topobatimétrica, para la predicción de escenarios climáticos sobre el río Sinú, tramo Montería, Colombia.
- Analizar la respuesta hidrológica del río Sinú, para generar mapas de zonificación asociados a la susceptibilidad de inundación, sobre la zona urbana de Montería, Colombia.
- Identificar posibles propuestas de solución, para reducir el riesgo de inundaciones, sobre la zona urbana de Montería.

# **1. FENÓMENOS HIDROMETEOROLÓGICOS, CAUSAS Y EFECTOS**

Un fenómeno es una expresión o manifestación física que se comprueba a partir de la observación directa, este puede ser físico, químico, biológico o generado por la acción del hombre. Se le llama hidrometeorológico cuando el fenómeno es generado por una combinación de agentes atmosféricos como la humedad, la temperatura, el viento, la precipitación, en diversas intensidades y combinaciones, generando ciclones tropicales, lluvias extremas, tormentas de nieve, granizo, polvo y electricidad; heladas, sequías, tornados, ondas cálidas y gélidas (SEMARNAT, 2019).

El que suceda un fenómeno natural no necesariamente provoca un desastre, estos fenómenos deben de considerarse como elementos activos de los procesos propios de nuestro planeta. La diferencia entre la existencia o no de un desastre, radica justamente en la consideración de los peligros naturales a los que estamos expuestos, aplicando las medidas de prevención para enfrentar sus efectos. La relación entre peligros naturales (como sismos, huracanes o tsunamis) y las condiciones de vulnerabilidad, definidas a partir de las características socioeconómicas y físicas específicas de una población o lugar como una situación económica precaria, viviendas mal construidas o ubicadas en sitios no adecuados, con materiales de baja resistencia, entre otras condiciones, es lo que definirá la existencia o no de un desastre. Los peligros relacionados con el clima (fenómenos hidrometeorológicos) han modificado los cálculos históricos sobre su frecuencia y magnitud; cada vez son más impredecibles, difícilmente controlables y destruyen los pilares del cálculo convencional sobre riesgo y seguridad (OEA, 1991)

Un análisis de los peligros asociados al clima inicia con la revisión de las precipitaciones históricas, la estimación de los escurrimientos sobre una zona determinada y la delimitación de cuencas hidrográficas, en la que los peligros relacionados con dicho ciclo son importantes para la conservación y manejo sustentable, ya que las acciones que realizamos en sobre las cuencas, incrementan o disminuyen la susceptibilidad a ser afectadas por los peligros

hidrometeorológicos. Los ciclones, sequías, granizadas, nevadas, tormentas de arena, inundaciones, torrentes de lodo, aludes, y erosión del suelo, además de incrementar su frecuencia y magnitud por efecto del calentamiento global, pueden generar aún más daño si propiciamos la deforestación, los incendios y la ubicación de la infraestructura y asentamientos humanos en zonas expuestas a dichos fenómenos (CEPAL/PNUMA, 2014)

Por la importancia de los impactos y el reto para prevenir los daños asociados a fenómenos hidrometeorológicos, se describen estos fenómenos como los ciclones y la sequía, así como también las inundaciones que surgen como producto de la abundancia de agua, generado por anomalías climáticas, así como con el mal manejo del territorio o una combinación de ambas.

### **1.1. Ciclones**

Un ciclón tropical es un sistema atmosférico cuyo viento circula en dirección ciclónica, es decir, en el sentido contrario a las manecillas del reloj en el hemisferio norte, y en el sentido de las manecillas del reloj en el hemisferio sur. El ciclón tropical se origina en las regiones tropicales de nuestro planeta, la circulación ciclónica y bajas presiones atmosféricas relativas normalmente coexisten, así que, estos sistemas de tormenta exigen dos requisitos básicos: calor y humedad. En consecuencia, sólo se desarrollan ciclones en los trópicos, entre las latitudes 5° y 30° norte y sur (Figura 5), en las regiones y temporadas en que la temperatura del mar es superior a los 26° C (CENAPRED & IMTA, 2021).

Los ciclones tropicales han causado algunos de los mayores desastres, provocando pérdidas de vidas humanas, muerte de ganado, así como pérdidas económicas importantes, sin embargo, a pesar de los daños que puedan llegar a presentarse por la ocurrencia de ciclones, estos juegan un papel importante en la distribución de la lluvia, consiguiendo que las zonas áridas y semiáridas puedan beneficiarse de lluvias excedentes, cuyo escurrimiento generado por éstas pueda ser almacenado en presas. (FAO, 2021).

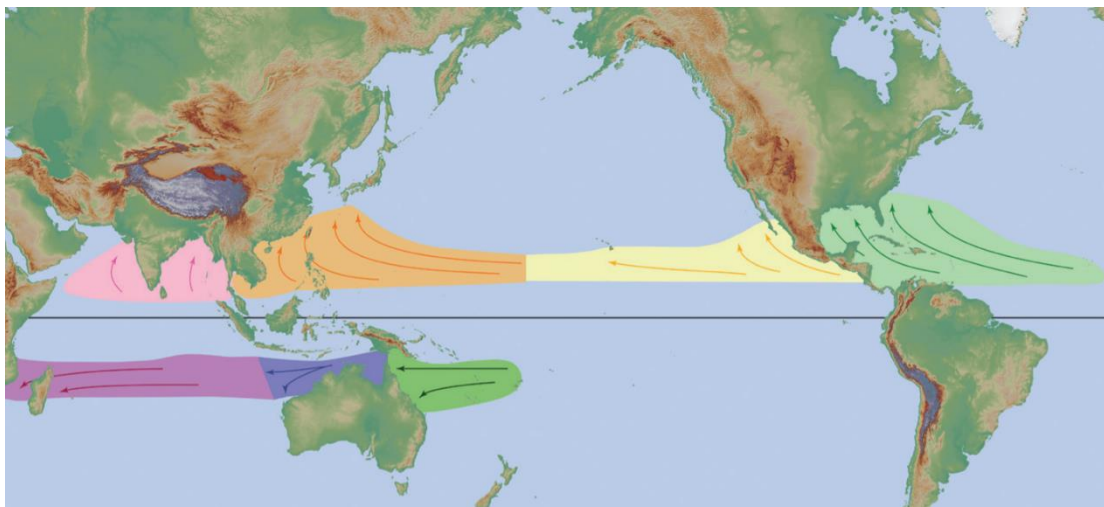


Figura 5. Regiones de formación de ciclones con el promedio de trayectoria (Fuente: NOAA, 2013).

Para convivir con estos fenómenos naturales, se requiere llevar a cabo acciones para protegerse de sus efectos, a través de la comunicación entre autoridades y población, buscando estrategias para exponer lo menos posible la vida de la gente que vive cerca de costas, ríos y laderas, así como sus bienes, y tener preparados refugios temporales, en caso de presentarse situaciones de peligro. Es importante el conocimiento científico-técnico de los ciclones tropicales, la preparación y capacitación de las autoridades para el manejo de emergencias como las derivadas de la presencia de estos fenómenos, la difusión a la población de medidas de mitigación, y de hacerle comprender que la autoprotección es la clave para salvar la vida y sus bienes, lo cual significa atender a los llamados de las autoridades, evitando exponerse a riesgos tales como inundaciones, oleaje, viento e inestabilidad de laderas (NOAA, 2013).

## 1.2. Sequías

Las sequías son un fenómeno que se origina cuando la precipitación y/o la disponibilidad de agua en un lugar y tiempo son menores al promedio histórico, afectando las actividades humanas. Las sequías son impredecibles, lo mismo que su duración, pues a mayor tiempo, mayor progresividad. Son consideradas uno de los fenómenos de mayor peligro y afectación en el mundo (SEMARNAT, 2019).



Existen varias definiciones para la sequía, una de ellas es propuesta por la *American Meteorological Society* (Campos-Aranda, 1998), la cual señala que “La sequía es un periodo caracterizado por un prolongado y anormal déficit de humedad”. Otra definición considerando la falta de lluvias, es la siguiente: “La sequía es un fenómeno meteorológico que ocurre cuando la precipitación, en un lapso, es menor que el promedio, y cuando esta deficiencia es lo suficientemente grande y prolongada como para dañar las actividades humanas”. Sin embargo, no existe una definición totalmente aceptada, estas dependen del enfoque científico o de la actividad económica que se afecta (CENAPRED, 2021).

Las principales causas de las sequías están relacionadas con cambios en las presiones atmosféricas, y alteraciones en la circulación general de la atmósfera (variaciones de los vientos a escala planetaria), así como modificaciones en la cantidad de luz solar reflejada en la superficie de la Tierra, cambios en la temperatura de la superficie de los océanos e incrementos en las concentraciones de bióxido de carbono en la atmósfera, que a su vez ocasionan variaciones espacio-temporales de las precipitaciones (Inifap, 2006).

El resultado de las sequías son las afectaciones sobre grandes extensiones de terreno de cultivo, provocando la muerte de numerosas cabezas de ganado. Se disminuye la disponibilidad de agua para la producción industrial y pueden afectar el uso doméstico de los habitantes. Las ondas de calor presentes en las sequías pueden causar la muerte por deshidratación de seres humanos, sobre todo niños y ancianos, aumentando considerablemente las enfermedades gastrointestinales (SEDATU, 2011).

Las medidas de prevención para afrontar las sequías están orientadas, por un lado, a políticas de uso eficiente del agua en los hogares, la agricultura, la ganadería y en la industria y, por otro, a aumentar la capacidad de almacenamiento del agua y conducirla adecuadamente a su destino final. Algunas de estas medidas pretenden disminuir la demanda de agua e incrementar su oferta, mientras que, las medidas de control de sequías están orientadas en dos sentidos, por una parte, aumentar la oferta de agua aumentando la infraestructura hidráulica, y por otra, reducir o limitar

la demanda de ésta para sus diferentes usos. Las medidas están encaminadas a minimizar los impactos y los daños de las sequías y están regidas, tanto por la magnitud, como por la distribución temporal y espacial de ellas. Los estudios del comportamiento de las sequías pueden ayudar a disminuir sus efectos negativos, estos son fundamentales para establecer las políticas adecuadas de uso del agua antes y durante los períodos de sequía (Luna, 2021).

### **1.3. Inundaciones**

Se tienen diferentes definiciones para las inundaciones, según el Diccionario de la Real Academia Española, es la acción y efecto de inundar, o cubrir los terrenos y a veces las poblaciones. En el Glosario Hidrológico Internacional (OMM N°385, 2012) se define inundación como el desbordamiento del agua fuera de los confines normales de un río, o cualquier masa de agua y/o la acumulación de agua procedente de drenajes en zonas que normalmente no se encuentran anegadas. La Directriz Básica de Planificación de Protección Civil (1995), define inundación como la sumersión temporal de terrenos normalmente secos, como consecuencia de la aportación inusual y más o menos repentina de una cantidad de agua superior a la que es habitual en una zona determinada. La Agencia Federal de Gestión de Emergencias de los Estados Unidos (2014) cuantifica incluso la superficie anegable para que se considere inundación: una condición temporal y general de inundación completa o parcial de dos o más acres (0.81 Ha) de terrenos normalmente secos.

La presencia de asentamientos cercanos a los márgenes del río son una problemática antigua y recurrente, pero al iniciar la globalización, se presenta un crecimiento descontrolado de la población, las ciudades empiezan a crecer y los asentamientos humanos llegan a ubicarse en las llanuras de inundación de los ríos, trayendo consigo problemas de inundaciones al desbordar una corriente. Además, la degradación del medio ambiente, como la deforestación, la erosión, modifica la respuesta hidrológica en cuencas, incrementando la ocurrencia y magnitud de las inundaciones. Sin embargo, el impacto de las inundaciones no siempre es negativo, ya que normalmente forma parte de un ciclo natural y puede tener grandes

beneficios medioambientales y sociales, especialmente en las zonas que han sufrido una sequía prolongada o en lugares en donde las inundaciones son periódicas, y por tanto son cruciales para los ecosistemas en la mayoría de los humedales ribereños y costeros (CENAPRED, 2012)

La modificación del uso de suelo en las cuencas producen daños cada vez más considerables por efecto de las inundaciones, esto debido a que se producen crecientes mayores que las que habían ocurrido cuando las cuencas eran naturales o la degradación del medio ambiente era mínima, y que el tiempo que debe transcurrir para que los efectos de una inundación sean percibidos por la población ha disminuido, provocando que en ocasiones la respuesta de las autoridades y de la población se vea comprometida (Salas & Jiménez, 2014).

La clasificación de las inundaciones, relacionadas con el origen y la forma en que pueden presentarse, permiten un mayor entendimiento del comportamiento de las crecidas y la formas en que se puede reaccionar estos fenómenos.

### **1.3.1. Clasificación de las inundaciones**

Las inundaciones se pueden presentar por diferentes situaciones, clasificándose de acuerdo con su origen y al tiempo que tardan en presentarse sus efectos, para ello se describe a continuación su descripción:

### **1.3.2. Inundaciones según su origen**

Dentro de esta clasificación, se encuentran las inundaciones causadas por el exceso de lluvia, desbordamientos de lluvias, incremento de la marea y falla de obras hidráulicas. El conocer las causas que originan las inundaciones permite elaborar estrategias para reducir el riesgo de desbordamientos.

De acuerdo con Salas & Jiménez (2014), los tipos de inundaciones según su origen, se muestran a continuación:

- **Inundaciones pluviales.** Son consecuencia de la precipitación, se presentan cuando el terreno se ha saturado y el agua de lluvia excedente comienza a

acumularse, pudiendo permanecer horas o días. Su principal característica es que el agua acumulada es agua precipitada sobre esa zona y no la que viene de alguna otra parte. La presencia de fenómenos hidrometeorológicos y su interacción entre ellos como la presencia de huracanes con frentes fríos, trae consigo la presencia de lluvias intensas que genera el incremento del nivel del agua en ciertas zonas.

- **Inundaciones fluviales.** Se generan cuando el agua que se desborda de los ríos queda sobre la superficie de terreno cercano a ellos. A diferencia de las pluviales, en este tipo de inundaciones, el agua que se desborda sobre los terrenos adyacentes corresponde a precipitaciones registradas en cualquier parte de la cuenca tributaria, y no necesariamente a lluvia sobre la zona afectada. La acumulación del caudal a través de los ríos, junto a la presencia de lluvias intensas en ciertas zonas de la cuenca, trae consigo avenidas importantes siendo rebasada la capacidad hidráulica del cauce, por lo que pueden presentarse desbordamientos en zonas vulnerables.
- **Inundaciones costeras.** Se presentan cuando el nivel medio del mar asciende debido a la marea y permite que éste penetre tierra adentro, en las zonas costeras, generando el cubrimiento de grandes extensiones de terreno. La presencia de tormentas genera vientos que aumentan el nivel de la marea, incrementando el oleaje, empujando el agua hacia las costas, lo que ocasiona daños a la propiedad, erosión de las playas, bloque de caminos, siendo una amenaza para poblaciones costeras.
- **Inundaciones por fallas de infraestructura hidráulica.** Este tipo de inundaciones ocurre por diferentes razones, por ejemplo, un diseño escaso que por falta de información, criterios o metodologías inadecuadas se realiza el diseño de obras, provocando fallas en el funcionamiento hidráulico de las estructuras; la mala operación de las estructuras, como la abertura excesiva puede generar inundaciones aguas abajo del río, así como no abrir lo suficiente una compuerta puede sobrepasar la capacidad de una cortina ocasionando una falla en la presa; un mal mantenimiento o el término de la vida útil de la obra se

presenta, los azolves o filtraciones son indicios de posibles fallas que deben revisarse.

### **1.3.3. Inundaciones según el tiempo en presentarse sus efectos**

Las características de la cuenca son los principales factores que determinan la respuesta hidrológica que se tendrá, presentándose avenidas que generan inundaciones en minutos hasta tardar horas o días. Los tipos de inundación clasificadas por el tiempo en presentar sus efectos, son los siguientes (Cruz Roja Colombiana, 2000):

- **Inundaciones lentas.** Las inundaciones lentas se presentan cuando el agua producto de lluvias o del desbordamiento de una corriente de agua cubre poco a poco zonas cercanas a su cauce, llenando de agua las planicies y valles que rodean el río, así como a las viviendas, construcciones, lotes y cultivos entre otros. En época de tormentas, las lluvias fuertes y prolongadas caen sobre llanuras y planicies, el agua puede ser absorbida por el suelo a la manera de una esponja. Si continúa la lluvia, esa especie de esponja natural se saturará de agua facilitando el encharcamiento y luego la inundación. En otros casos, aunque la lluvia no caiga en los valles y tierras planas, si las tormentas son fuertes y prolongados en las partes altas de la cuenca, los niveles del río irán aumentando lentamente hasta superar la capacidad del cauce y producir así la inundación por desbordamiento.
- **Inundaciones súbitas.** Son el resultado de lluvias repentinas e intensas que ocurren en áreas específicas, pueden ocasionar que pequeñas corrientes se transformen, en cuestión de minutos, en violentos torrentes capaces de causar grandes daños. Se pueden presentar en zonas montañosas que presentan pendientes elevadas, así como zonas con deforestación o poca cubierta vegetal, presentando altas índices de escurrimientos.

La diferencia entre inundaciones lentas e inundaciones súbitas es el tiempo que tardan en manifestarse los efectos desde que comienza a llover hasta que se genera el escurrimiento. Ambas clasificaciones de las inundaciones generan graves

afectaciones económicas y sociales, incluso la pérdida de vidas humanas ante la escasa prevención ante este tipo de eventos.

### **1.3.4. Mitigación de daños por inundaciones**

La mitigación de daños por inundaciones se refiere a las acciones de protección contra los daños que pueden presentar las inundaciones, encontrándose medidas estructurales que busca la construcción de obras con el fin de proteger zonas vulnerables, y las medidas no estructurales que se refiere a medidas institucionales o de prevención como la elaboración de mapas de riesgo, sistemas de alerta temprana y diseñar estrategias en caso de emergencias.

#### **1.3.4.1. Medidas estructurales**

Las medidas estructurales son obras de ingeniería implementadas para reducir el riesgo de crecidas, que pueden ser extensivas o intensivas. Las medidas extensivas son aquellas que actúan en la cuenca, intentando modificar las relaciones entre precipitación y caudal como la alteración de la cobertura vegetal del suelo, que reduce y retarda los picos de crecidas y controla la erosión de la cuenca. Las medidas intensivas son aquella que reaccionan en el río y pueden ser de tres tipos (Tucci, 2007):

- Aceleran el escurrimiento: construcción de diques y pólderes, aumento de la capacidad de descarga de los ríos y corte de meandros;
- Retardan el escurrimiento: reservorios y cuencas de amortiguamiento;
- Desvío del escurrimiento: obras como canales de desvíos;

El objetivo de las medidas estructurales es evitar o mitigar los daños provocados por una inundación, mediante la construcción de obras, por ejemplo, para proteger una zona urbana surcada por un río se pueden proponer como medidas estructurales la retención, almacenamiento y derivación del agua, hacer modificaciones al cauce (canalizarlo o entubarlo), construir bordos o muros de encauzamiento y modificar puentes o alcantarillas.

### **1.3.4.2. Medidas no estructurales**

Las medidas no estructurales se basan en la planeación, organización, coordinación y ejecución de acciones que buscan disminuir los daños causados por las inundaciones, y pueden ser de carácter permanente o aplicable sólo durante la contingencia. Las principales acciones por desarrollar dentro de este tipo de medidas se relacionan con la conservación y cuidado de las cuencas, la elaboración de mapas de riesgo y reordenamiento territorial, la vigilancia y alerta, la operación de la infraestructura hidráulica, los planes de protección civil, la difusión de boletines de alerta y la evacuación de personas y bienes afectables (Salas, 2014).

Para complementar este tipo de medidas, se elaboran modelos matemáticos aplicados por medio de programas de cómputo para la planeación y manejo del agua en muchos países. El papel de los modelos en el manejo del agua involucra diferentes aspectos desde el desarrollo, control, protección, regulación y uso de este recurso. Los servicios y resultados de los modelos pueden ser utilizados en diferentes sectores como el municipal, el agrícola y el industrial. También los resultados pueden servir para proteger el medio ambiente, en la generación de energía eléctrica, para el control de la erosión y la sedimentación, así como para el control de avenidas y, por lo tanto, para la disminución de daños por inundaciones (Salas & Jiménez, 2014).

Las actividades para el manejo y planeación del agua están orientadas a crear políticas a escala nacional, regional y local, del uso adecuado de este recurso, así como a la creación de estrategias, planeación, diseño, construcción, mantenimiento y operación de las obras hidráulicas. Los modelos matemáticos, desde una perspectiva científica, contribuyen a un mejor entendimiento del proceso real del fenómeno, así como a brindar información cuantitativa para la toma de decisiones (CONAGUA, 2011).

Para entender como el clima y su variación a lo largo del tiempo tiene implicaciones en el origen del aumento en la frecuencia de los fenómenos hidrometeorológicos,

se describen algunos factores atribuidos a causas naturales y antropogénicas que pueden contribuir en la incidencia de las inundaciones.

#### **1.4. Variabilidad climática**

El clima depende de un gran número de factores atmosféricos y oceánicos que interactúan de manera compleja en diferentes escalas, por ello, los patrones de comportamiento de los fenómenos meteorológicos (tormentas, granizadas y heladas, entre otros) y de las variables climatológicas (temperatura, humedad y precipitación) tienen un impacto directo y heterogéneo en la distribución de la biodiversidad, la provisión de servicios ecosistémicos y el bienestar y las actividades humanas (Pinilla H. *et al.*, 2012).

La variabilidad del clima se refiere a los cambios en el estado medio, y otros datos estadísticos (como las desviaciones típicas, la ocurrencia de fenómenos extremos, etc.) del clima en todas las escalas temporales y espaciales, más allá de fenómenos meteorológicos determinados. La variabilidad se debe a procesos internos naturales dentro del sistema climático (variabilidad interna), o a variaciones en los forzamientos externos antropogénicos (variabilidad externa). La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (2016), distingue al cambio climático, el atribuido a actividades humanas que alteran la composición atmosférica, mientras que, variabilidad climática es atribuida a causas naturales. (IDEAM *et al.*, 2016)

Dentro de las escalas temporales de la variabilidad climática, las siguientes se consideran las de mayor importancia en la determinación y modulación de procesos atmosféricos (IDEAM *et al.*, 2016):

- **Estacional:** A esta fase corresponde la fluctuación del clima a escala mensual. La determinación del ciclo anual de los elementos climáticos es una fase fundamental dentro de la variabilidad climática a este nivel. En latitudes medias, la secuencia de las estaciones de invierno, primavera, verano y otoño es algo común para los habitantes de dichas regiones, en tanto que, en latitudes



tropicales, lo frecuente es la alternancia de temporadas lluviosas y temporadas secas.

- **Intraestacional:** Existen evidencias de que dentro de las estaciones se presentan perturbaciones que determinan las condiciones de tiempo durante decenas de días. La mayoría de las veces estas oscilaciones pasan inadvertidas porque su amplitud es pequeña, en comparación con las del ciclo anual, dentro de las oscilaciones intraestacionales se destaca una señal de tipo ondulatorio, denominada de 30-60 días.
- **Interanual:** A esta escala corresponden las variaciones que se presentan en las variables climatológicas de año en año. Normalmente percibimos que la precipitación de la estación lluviosa en un determinado lugar no siempre es la misma de un año a otro, sino que fluctúa por encima o por debajo de lo normal. Ejemplos típicos de la variabilidad climática interanual corresponden a los fenómenos enmarcados dentro del ciclo El Niño - La Niña - Oscilación del Sur, ENSO y la Oscilación Cuasibienal, la cual corresponde a una oscilación de largo plazo en la dirección del viento zonal de la baja y media estratosfera ecuatorial, con un período irregular que varía entre 20 y 35 meses, en cada lapso se alternan los vientos de componente Este con los del Oeste.
- **Interdecadal:** En esta escala se manifiestan fluctuaciones del clima a nivel de décadas. Comparativamente con la variabilidad interanual, la amplitud de estas oscilaciones es menor. Ésta es una de las razones por las cuales este tipo de variabilidad pasa inadvertida para el común de la gente.

En los últimos años, se ha hecho imprescindible la generación de conocimiento, información y herramientas para analizar la variabilidad, y el cambio climático a diferentes escalas territoriales (global, regional, local). Para mejorar esa información, se requiere incorporar paulatinamente a los modelos numéricos nuevos conocimientos de la dinámica atmosférica, que describan la variabilidad y el cambio climático, además de validar su desempeño por regiones y por variable, esto aprovechando los avances de la tecnología en transmisión y procesamiento de

datos, lo cual se ha traducido en una mejora de las simulaciones numéricas del clima regional (INECC, 2016)

La simulación de la evolución de la atmósfera se hace mediante modelos numéricos de circulación general atmosférica, que resuelven las ecuaciones que gobiernan la atmósfera con condiciones de frontera, dirigidas especialmente a la respuesta del clima a forzamientos externos, como cambios en la radiación solar, temperatura de la superficie del mar, concentraciones de gases de efecto invernadero, para obtener los estados futuros de la atmósfera. A través de técnicas estadísticas se puede inferir el estado futuro atmosférico utilizando las series de registros históricos observados en un sitio en particular o región de interés (IDEAM, 2021).

Consecuencia de la variabilidad climática, surge la presencia de eventos climáticos extremos que ocasionan afectaciones hacia la agricultura, infraestructura y la economía de una región, por lo anterior, se analizan las características y el registro histórico de los eventos climáticos para entender el comportamiento en la actualidad del clima.

#### **1.4.1. Eventos climáticos extremos**

Los eventos extremos se pueden definir estadísticamente como aquellos que se encuentran por encima del noventa percentil y por debajo del décimo percentil de una distribución de probabilidad observada de alguna variable, es posible definir estos eventos, de acuerdo con su impacto asociado a daños y pérdidas. Existen eventos meteorológicos extremos y eventos climáticos extremos, el primero se asocia con patrones meteorológicos cambiantes, por lo que su escala de tiempo es de menos de un día o hasta algunas semanas. En cambio, cuando se refiere a un evento climático extremo, se refiere a una escala de tiempo mayor, ya que puede ser la acumulación de eventos meteorológicos (extremos o no), influenciados por los cambios en el clima que puede conducir a modificaciones en la frecuencia, intensidad, extensión espacial y duración de los eventos; por ejemplo, la acumulación de días promedio de lluvia sobre una temporada o condiciones de sequía (INECC, 2016).

Para los eventos extremos de temperatura y precipitación, desde 1950, a escala global, se han observado cambios donde el número de días y noches frías estén descendiendo, mientras que el número de días y noches cálidas se están incrementando, es decir, los eventos cálidos se han incrementado mientras que los fríos han disminuido (Taylor, 2015).

Un incremento en la frecuencia y/o intensidad de eventos extremos, de variables como la temperatura y precipitación, pueden ocasionar un mayor impacto en sectores socioeconómicos y ambientales biofísicos, por lo tanto, es de suma importancia detectar cambios en este tipo de eventos. Los eventos extremos no siempre están asociados a la ocurrencia de un desastre, estos eventos pueden conducir a un desastre sí la población se expone a tal evento, y sí esa exposición está acompañada de un alto nivel de vulnerabilidad (SEMARNAT, 2021).

Entre los fenómenos naturales que generan eventos climáticos extremos son El Niño Oscilación del Sur (ENOS), el cual puede provocar lluvias intensas, inundaciones o sequías en determinadas regiones.

#### **1.4.2. Fenómeno de El Niño Oscilación del Sur (ENOS)**

El Niño - Oscilación del Sur es un fenómeno natural caracterizado por la fluctuación de las temperaturas del océano en la parte central y oriental del Pacífico ecuatorial, asociada a cambios en la atmósfera, tiene una gran influencia en las condiciones climáticas de diversas partes del mundo. Los progresos científicos han permitido la comprensión y la modelización del ENOS, y las competencias de predicción han mejorado en escalas temporales de uno a nueve meses de antelación, lo que ayuda a la sociedad a prepararse para los peligros asociados a ese fenómeno, tales como las fuertes lluvias, las inundaciones y las sequías. Este fenómeno consta de dos componentes oceánicos, El Niño y La Niña (Figura 6), mientras que la Oscilación del Sur es el componente atmosférico, y ambos dan origen al término El Niño/Oscilación del Sur (OMM, 2014).

La componente oceánica del ENOS es El Niño, se caracteriza por un calentamiento anómalo de las aguas superficiales del centro y este del océano pacífico tropical,

que produce una profundización de la termoclina oceánica, también asociado con el debilitamiento de los vientos alisios del este y con el desplazamiento del centro de convección del oeste al centro del océano pacífico tropical.

La componente atmosférica del ENOS, conocida como la Oscilación del Sur, genera un gradiente de presiones entre el oeste y el este del océano pacífico ecuatorial, es generalmente un centro de alta presión se localiza en Tahiti, mientras que un centro de baja presión se localiza en Indonesia y el norte de Australia cerca de Darwin (Cruz & Karime, 2012).

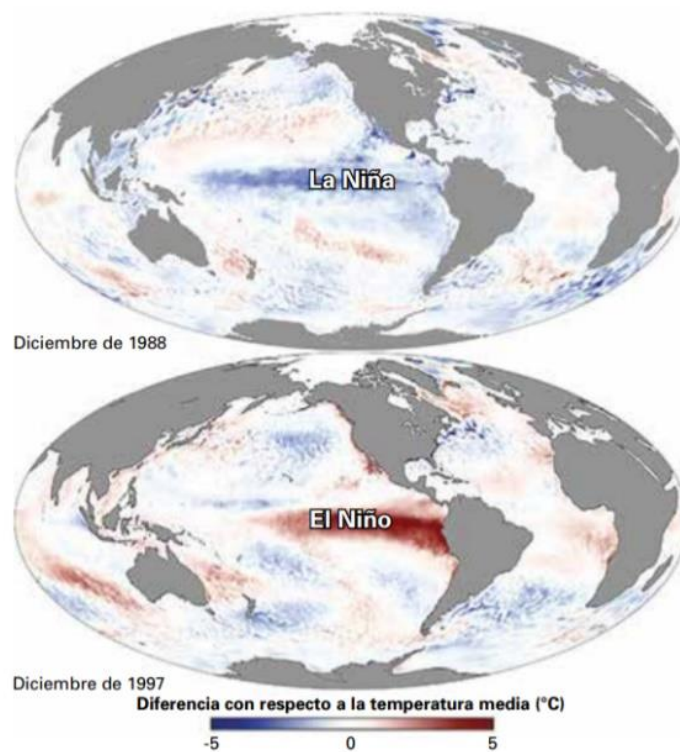


Figura 6. Mapa de anomalías de las temperaturas de superficie del océano pacífico durante fuertes episodios de La Niña y El Niño (OMM, 2014).

Este gradiente de presiones atmosféricas es comúnmente representado por el Índice de Oscilación del Sur (SOI), es definido por Walker (2017) como la diferencia estandarizada de las anomalías mensuales de presión atmosférica entre Tahití y Darwin (Australia). El índice es positivo cuando la diferencia entre este y oeste, es más alta de lo normal, y negativo cuando es inferior a lo habitual. La fase cálida del

ENOS (El Niño) está asociada a un índice bajo o negativo y la fase fría (La Niña), a un índice alto o positivo (Palacios *et al.*, 2017)

### 1.4.3. Fenómeno de El Niño

El fenómeno de El Niño es un término que usaron por primera vez en el siglo XIX, los pescadores de Perú y Ecuador, para referirse a las aguas inusualmente cálidas, causantes de una reducción de sus capturas, que observaron justo antes de navidad (Figura 7). Los episodios de El Niño suelen empezar a mediados de año con un calentamiento a gran escala de las aguas de superficie en la parte central y oriental del Pacífico ecuatorial y cambios de la circulación atmosférica tropical, es decir, el viento, la presión y la precipitación (Montealegre, 2014).

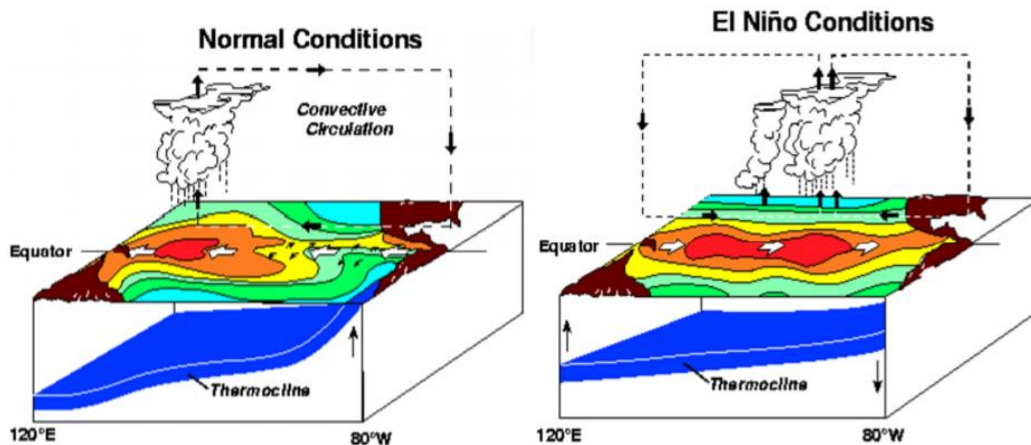


Figura 7. Representación de las condiciones oceánicas y atmosféricas del Pacífico, durante los períodos normales y de ocurrencia de los fenómenos El Niño (Fuente: NOAA/PMEL/TAO Project, USA).

En general, El Niño alcanza su intensidad máxima durante el período de noviembre a enero y luego decae a lo largo de la primera mitad del año siguiente, ocurre cada dos a siete años y puede durar hasta 18 meses. Los episodios intensos y moderados de El Niño producen un calentamiento de las temperaturas medias globales en superficie. En condiciones normales, la superficie del océano en la zona oeste del Pacífico tropical siempre es caliente, la presión atmosférica es baja y las precipitaciones son frecuentes e intensas, mientras que, en el extremo opuesto del Pacífico, (cerca de Suramérica), el agua es relativamente fría, la presión atmosférica es alta y hay poca lluvia. La zona central y oriental del Pacífico se calienta y se torna

más lluviosa, y en el extremo occidental del pacífico se presentan condiciones más secas y frescas (OPS, 2000).

#### 1.4.4. Fenómeno de La Niña

El fenómeno opuesto de El Niño en el ciclo del ENOS se conoce como La Niña, y se trata del enfriamiento a gran escala de las temperaturas de la superficie del océano en la misma región del Pacífico ecuatorial, sumado a una inversión de las condiciones de la atmósfera suprayacente (Figura 8). En muchos lugares, especialmente en los trópicos, La Niña (o episodios de frío) produce las variaciones climáticas opuestas a las de El Niño (OMM, 2014).

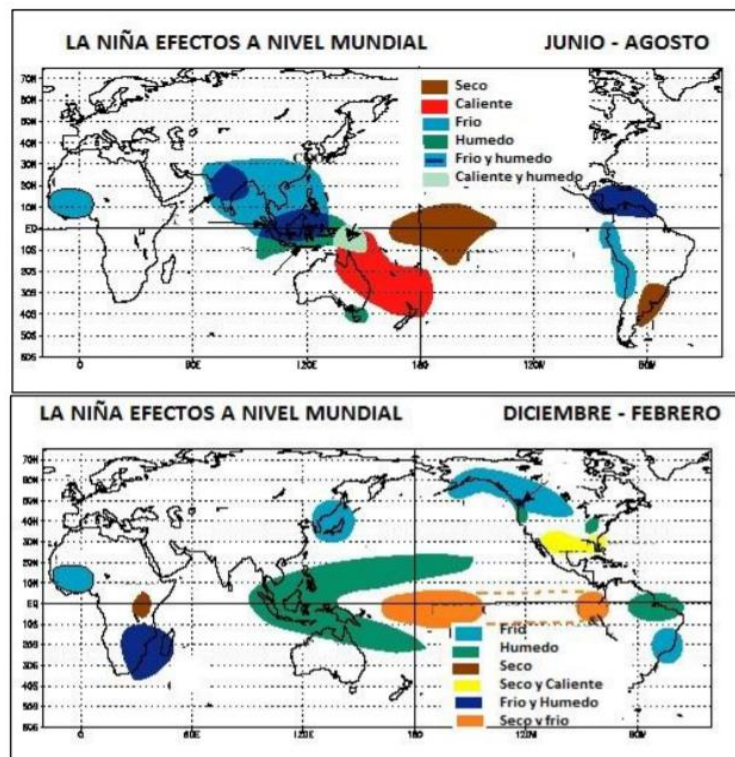


Figura 8. Anomalías en la precipitación invierno/verano, durante un evento La Niña (Fuente: OMM, 2014)

Durante el fenómeno de La Niña, se presenta una disminución en la temperatura del agua superficial del Océano Pacífico en la zona comprendida entre Australia y Nueva Guinea y Colombia, Ecuador y Perú. En Colombia, este fenómeno suele expresarse con una disminución de la temperatura promedio y un aumento de las lluvias en casi todo el país (Bitrán, 1998).

#### **1.4.5. Variabilidad interanual de la precipitación en Colombia**

Dada su localización geográfica, Colombia recibe la influencia directa de los procesos que se suscitan en el sistema acoplado océano-atmósfera del Pacífico tropical, asociados al Ciclo ENOS. Se ha podido establecer claramente que la intensidad de los fenómenos El Niño y La Niña está en función directa con la magnitud de las anomalías registradas en la temperatura superficial y subsuperficial del océano y con el área cubierta por las mismas. El efecto climático depende de la época del año en que se presentan los fenómenos y el impacto socioeconómico está más relacionado con la vulnerabilidad de las diferentes regiones del país y de los sectores de la actividad nacional (Montealegre, 2014).

El clima de Colombia, durante el 2009-2010 presentó periodos extremos relacionado con las condiciones fluctuantes a través del pacífico tropical. En el año 2009 estuvo influenciado bajo el efecto de un episodio moderado de El Niño, que se mantuvo hasta el mes de mayo, dando lugar a que el primer trimestre presentara condiciones bastantes secas. Tras la rápida disipación de este evento a principios de mayo de 2010, en el pacífico tropical surgieron las condiciones frías características de La Niña que, sumado a una condición cálida del Caribe y Atlántico tropical, alteraron el comportamiento de las variables climáticas desde superficie hasta la baja estratosfera (Aristizábal, 2011).

El aumento de los volúmenes de lluvias sobre Colombia provocó flujo de agua inusual en gran parte del territorio nacional, especialmente en la región Caribe, Andina y Pacífica, durante el segundo semestre de 2010, provocaron inundaciones, deslizamientos y movimientos en masa, que ocasionaron desastres de extraordinarias proporciones en el territorio colombiano, dentro de las regiones Caribe y Andina, presentado pérdidas de vidas humanas, y afectación millones de personas producto de la emergencia (Euscategui & Hurtado, 2011).

Las variaciones en el clima atribuidas al hombre o el cambio climático se han analizado para entender su influencia en fenómenos naturales, identificando que el aumento de la temperatura del suelo y las precipitaciones, así como el incremento

de huracanes, están relacionados con un aumento calentamiento mundial asociado con las actividades del antropogénicas que alteran la composición del ambiente.

## **1.5. Cambio climático**

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (1994), define el cambio climático como una variación del clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observado durante períodos de tiempo comparables. Para el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) se refiere a la variación en el estado del clima identificable (mediante análisis estadísticos) a raíz de un cambio en el valor medio y en la variabilidad de sus propiedades, y que persiste durante un período prolongado, generalmente cifrado en decenios o en períodos más largos (Díaz, 2012). Sin embargo (Miller, 2007), sostiene que el cambio climático global se refiere a las modificaciones en cualquier aspecto del clima del planeta, tales como la temperatura, precipitación e intensidad y las rutas de las tormentas.

El Programa de la Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), en su informe de Desarrollo Humano (2007-2008) establece que el cambio climático es un problema que determina el desarrollo humano en nuestra generación, este reduce los esfuerzos que se emprenden en el ámbito internacional con el fin de combatir la pobreza. Los modelos climáticos actuales predicen un calentamiento mundial de cerca de 1.4 - 5.8 grados Celsius entre 1990 y 2100, proyecciones que se basan en un conjunto de hipótesis acerca de las principales fuerzas que dirigen las emisiones futuras; tales como el crecimiento poblacional y el cambio tecnológico, pero no parten de la base de que hay que aplicar políticas sobre cambio climático para reducir las emisiones (IPCC, 2007).

De acuerdo con informes del IPCC (2007), se resalta que las causas del cambio climático son de origen natural y antropogénicas, mientras que los factores que afectan la temperatura media de la tierra y el cambio climático son las variaciones en el nivel del mar, los efectos de las nubes, la emisión de aerosoles a la atmósfera,



aumento en las emisiones de dióxido de carbono, gas metano, hidratos de metano. Existe una relación entre las emisiones de gases de efecto invernadero, las concentraciones atmosféricas, el forzamiento radiactivo, las respuestas climáticas y los efectos del clima. Entre 1970 y 2004, el aumento más importante de las emisiones de gases de efecto invernadero proviene de los sectores de suministro de energía, transporte e industria, observando un crecimiento en vivienda y el comercio, la silvicultura, la deforestación y la agricultura (Díaz, 2012).

Según el IPCC (2007), las observaciones obtenidas en todos los continentes y en la mayoría de los océanos evidencian que muchos sistemas naturales vinculados a la nieve, hielo y terreno congelado están siendo afectados por el aumento de la temperatura, afectando notablemente los sistemas climáticos y biológicos.

Se ha observado un descenso de la cubierta de nieve y una menor extensión de los hielos marinos en el hemisferio norte, el acortamiento de las estaciones gélidas en lagos y ríos, el deshielo de glaciares, avalanchas de rocas en regiones montañosas, cambios en algunos ecosistemas árticos y antárticos, desplazamiento hacia los polos y hacia niveles altos del ámbito geográfico de las especies vegetales y animales, entre otros. De igual manera, se observan los efectos del aumento de temperatura sobre diversos sistemas de gestión agrícola, forestal, salud humana, entre otros; evidenciando plantaciones más tempranas de cultivos en primavera en latitudes superiores del Hemisferio Norte, alteración de los regímenes de perturbación de los bosques por incendios y plagas, aumento de la mortalidad causada por el calor en Europa y cambios en los vectores de enfermedades infecciosas en ciertas partes de ese continente (Vargas, 2009).

### **1.5.1. Evidencia del cambio climático**

La región de Mesoamérica, que abarca desde México en el norte hasta Colombia en el sur, es una de las regiones más vulnerables al cambio climático a pesar de contribuir sólo con aproximadamente un 3% de las emisiones de los gases de efecto invernadero del planeta.

Se proyecta que las amenazas climáticas que experimenta la región de Mesoamérica (el incremento de la temperatura, la alteración del patrón de lluvias, el aumento del nivel del mar y una mayor frecuencia e intensidad de los eventos naturales extremos) se harán cada vez más graves, por ejemplo, se observa un aumento generalizado de las temperaturas en la región de 0,5 °C para el año 2020 y 1 °C para 2040, así como un marcado aumento de la variabilidad de los patrones de lluvia, sin embargo, en términos generales, los mayores impactos del cambio climático en la región se deben al incremento de los fenómenos hidrometeorológicos, como huracanes, ciclones, sequías, con graves consecuencias en el sector agrícola, en la infraestructura y en las vidas humanas (Espinoza, 2010).

En Colombia, la evidencia sobre el calentamiento del planeta es incontrovertible. El monitoreo sistemático del espesor de los glaciares por el IDEAM, permite identificar que, de manera similar al igual al resto del planeta, los glaciares colombianos pierden entre 50 centímetros y un metro de espesor al año, retrocediendo consecuentemente entre diez y veinte metros al año. El nevado de Santa Isabel tiene veinticinco metros de espesor en el sitio de mayor profundidad, perdiendo un metro de espesor al año. Desde 1960, el nivel del mar aumenta en promedio 1.8 milímetros al año en el planeta, mientras que, en los últimos diez años viene aumentando en 3.1 milímetros por año. El IDEAM ha registrado en las costas de Colombia, incrementos en el nivel del mar de entre 3 y 5 milímetros por año durante los últimos 50 años, observando para este período un incremento de 10 centímetros en el nivel medio del mar en las costas del Caribe y 22 centímetros en las costas del Pacífico colombiano, así como un aumento de 0.65°C en la temperatura promedio de la superficie durante los últimos 50 años (Rojas & Chacón, 2011).

La magnitud del cambio climático y sus impactos dependen de las decisiones políticas que los grandes emisores de gases efecto invernadero tomarán durante los próximos años. El IDEAM estima que en el 2050 puede desaparecer hasta el 80% del área glaciaria Colombia y el 60% del área de páramos podría estar altamente degradada, ocasionando implicaciones serias para la población y los sectores en

riesgo de desastres, donde una mayor intensidad de las lluvias y los huracanes puede provocar un mayor número de crecientes súbitas, de inundaciones y de deslizamientos de tierra, que son los eventos que generan el 90% de los desastres del país colombiano (Posada, 2007).

Para el análisis de los desastres es necesario conocer ciertos conceptos que están relacionados, como el peligro, vulnerabilidad y riesgo, identificando los factores que intervienen cuando se quiere entender la susceptibilidad de una población ante un desastre y el riesgo al que está expuesto, ante la presencia de fenómenos naturales, permitiendo crear estrategias para la gestión integral del riesgo ante las inundaciones, huracanes o cualquier desastre.

## **1.6. Peligro**

En el ámbito de la Protección Civil, la idea de evaluar el peligro significa cuantificar en términos de probabilidad, la ocurrencia, en un lapso dado, de un fenómeno potencialmente dañino para los bienes expuestos. Al momento de definir el peligro, conviene medir su potencial en relación con su intensidad, ya que la caracterización de un fenómeno está completa si se especifica su intensidad (Salas & Jiménez, 2014).

La Federación Internacional de Sociedades de la Cruz Roja y de la Media Luna Roja o IFCR (2019), define el peligro como la amenaza o probabilidad de que acontezca un fenómeno potencialmente perjudicial en una zona y en un período de tiempo determinado. Los peligros naturales son fenómenos físicos causados por acontecimientos de aparición lenta o repentina, que pueden ser geofísicos (terremotos, derrumbes, tsunamis y erupciones volcánicas), hidrológicos (avalanchas e inundaciones), climatológicos (temperaturas extremas, sequías e incendios), meteorológicos (ciclones y tormentas/oleadas) o biológicos (epidemias y plagas de animales o insectos). Los peligros tecnológicos o producidos por el hombre (emergencias complejas/conflictos, hambre, poblaciones desplazadas, accidentes industriales y accidentes de tránsito) son acontecimientos provocados

por el hombre y se producen cerca o dentro de asentamientos humanos, pudiendo causar degradación ambiental, contaminación y accidentes.

El peligro es considerado como una precondición humana desafortunada que se ubica en el nivel cognoscitivo, perceptivo o pre perceptivo y, además, con atribuciones de anticipación o inevitabilidad respecto al posible tránsito a su realización. Esta precondición puede relacionarse con la existencia de fenómenos naturales que pueden devenir amenazas, o bien con fenómenos antrópicos que igualmente devienen peligro, y cuyo origen tiene que ver estrictamente con las actividades humanas que generan amenaza, donde nuestras actividades e interacciones con el medio ambiente que pueden transformarse en peligros o amenazas (CUPREDER, 2011).

Desde el punto de vista de las inundaciones, el método ideal para la obtención del peligro se basa en la información que se registra en las estaciones hidrométricas, a partir de las cuales se conoce el escurrimiento y sólo se caracteriza estadísticamente la avenida, sin embargo, en la mayoría de los casos no se cuenta con tal información, por lo que un método alternativo es usar un modelo lluvia escurrimiento, para lo cual es necesario realizar estudios hidrológicos e hidráulicos. Una vez definido el periodo de retorno ( $T_r$ ) de interés, es posible conocer los niveles alcanzados por el agua en cualquier punto dentro de la zona de inundación.

## **1.7. Vulnerabilidad**

La vulnerabilidad se refiere a una relación compleja entre población, medio ambiente, relaciones, formas y medios de producción. La vulnerabilidad es siempre distinta según las circunstancias de cada persona o grupo social; se entiende como el grado con base en el cual los grupos, clases, regiones o países se comportan y sufren de manera distinta entre sí ante el riesgo en términos de las condiciones sociales, económicas y políticas específicas. También puede definirse como las características de una persona o grupo de ellas en relación con su capacidad de anticipar, enfrentar, resistir y recuperarse de un desastre, o como una condición por

la cual los asentamientos humanos o edificaciones se encuentran en peligro por su exposición y su fragilidad a una amenaza (CUPREDER, 2011)

La vulnerabilidad es considerada como la medida de la susceptibilidad de un bien expuesto a la ocurrencia de un fenómeno perturbador, donde al analizar dos bienes expuestos, uno es más vulnerable si ante la ocurrencia de fenómenos perturbadores con la misma intensidad, éste sufre mayores daños. A diferencia del peligro, que está definido por los patrones climáticos (la naturaleza) y debido a ello es difícil modificarlo, la vulnerabilidad es una variable que el hombre tiene la posibilidad de disminuir. Para obtener la función de vulnerabilidad, es necesario planear un censo de la población que esté en zonas potencialmente inundables, para ello, se diseñan encuestas que permitan evaluar los bienes expuestos para cada vivienda, creando las bases de datos para su ubicación dentro de la zona urbana (CENAPRED, 2014).

La vulnerabilidad, según Cruz & Karime (2012), se determina a partir de 3 factores:

- Exposición o fragilidad física: la ubicación de personas o bienes económicos en zonas propensas a amenaza, está compuesto por todos los individuos, hogares, clases, estados, ecosistemas, entre otros. Se caracteriza a través de la frecuencia, magnitud y duración.
- Sensibilidad o fragilidad social: la relación entre las condiciones humanas (capital social) y las condiciones ambientales (capital natural, riqueza suelo, agua, aire).
- Elasticidad o resiliencia: determina la respuesta, el impacto y el ajuste o adaptación, es decir, a partir de programas existentes, cuantas pérdidas se provocan y que nuevos programas surgen.

Los elementos que determinan la vulnerabilidad de una comunidad frente a las inundaciones son:

- Los usos del suelo y del agua.
- La presencia de asentamientos humanos y la densidad de población en zonas inundables.
- El nivel tecnológico y de organización.

- La infraestructura existente y el ordenamiento territorial.
- La concentración espacial de actividades industriales y de producción de bienes y servicios.
- La degradación del medio físico.
- La existencia y eficacia de los Sistemas de Atención y Prevención de Desastres, ahora denominados Sistemas de Gestión del Riesgo de Desastres.
- La existencia y eficacia de los Planes de Emergencia con Sistemas de Evacuación.

La vulnerabilidad se explica cuando existe una acumulación histórica de problemas persistentes de tipo ecológico, por ejemplo, modificación del medio ambiente, alta densidad de población, usos inapropiados de terrenos agrícolas; en relación con aspectos sociales se tiene la concentración de recursos, pauperización creciente, producción mayoritariamente de autoconsumo, y en general grandes diferencias sociales; también los problemas de tipo político como inestabilidad, sistemas autoritarios, ausencia de democracia, entre otros. En el manejo de los desastres, la vulnerabilidad es una variable sobre la que puede ejercerse control y planeación, es la acción prefigurada de la misma sociedad y su reducción no puede venir de fuera, sino de su modificación interna (CUPREDER, 2011).

## **1.8. Riesgo**

De acuerdo con el diccionario de la Real Academia Española (2020), se define el riesgo como una contingencia o proximidad de un daño, o como una contingencia que puede ser objeto de contrato de seguro. El concepto riesgo en el estudio de inundaciones tiene dos interpretaciones, en el primero se refiere al suceso, es decir, una inundación con una ocurrencia y magnitud dadas que deriva en peligro, en el segundo, riesgo se entiende como la probabilidad de ocurrencia del fenómeno.

El riesgo es evaluado de diferentes maneras, de acuerdo White (1974)  $\text{Riesgo} \times \text{Vulnerabilidad} = \text{Desastre}$ ; para Varnes (1984),  $\text{el Riesgo} = \text{Exposición} \times \text{Peligro} \times$

Vulnerabilidad; Maskrey (1989), el Riesgo = Peligro + Vulnerabilidad; para Wilches (1993) Desastre = Riesgo x Vulnerabilidad / Preparación; para Cardona (1993) el riesgo es evaluado como  $Rie = f(A_i, V_e)$ , pues asume que una vez conocida la amenaza o peligro ( $A_i$ ), entendida como la probabilidad de que se presente un evento con una intensidad mayor o igual a ( $i$ ) durante un período de exposición ( $t$ ), y conocida la vulnerabilidad ( $V_e$ ), entendida como la predisposición intrínseca de un elemento expuesto a ser afectado o de ser susceptible a sufrir una pérdida ante la ocurrencia de un evento con una intensidad ( $i$ ), el riesgo ( $Rie$ ) puede entenderse como la probabilidad de que se presente una pérdida sobre el elemento  $e$ , como consecuencia de la ocurrencia de un evento con una intensidad mayor o igual a ( $i$ ) (Chávez, 2018).

Se han elaborado estudios del riesgo, mediante una evaluación compleja, que es abordada mediante el análisis transversal para tener una visión integral de la problemática de una zona de estudio; esto mediante la gestión del riesgo, la cual se resume como la anticipación del desastre. De acuerdo con Calvo (2001) y Briones (2005), coinciden en que el análisis del riesgo debe efectuarse desde un punto de vista global, donde se destaca la necesidad de que el análisis abarque aspectos naturales, materiales y cognitivos bajo una óptica multidimensional, presentándose dificultades en los estudios de riesgo al tratar de integrar un abanico amplio de consideraciones en los análisis.

En Colombia, la presencia de llanuras bajas y valles aluviales, aunada a las condiciones de precipitación facilitan la ocurrencia de inundaciones, algunas de manera lenta, que afectan grandes extensiones de terreno, y otras más rápidas asociadas a lluvias intensas en la parte alta de las cuencas con fuertes pendientes, así como el crecimiento de la población y de los bienes localizados en áreas expuestas a fenómenos hidrometeorológicos son factores determinantes en el aumento del riesgo, donde las deficiencias en el conocimiento, la incorporación de las restricciones ambientales y las condiciones de riesgo en los procesos de planificación y ordenamiento urbano y regional, así como la falta de capacidad para cubrir las necesidades de vivienda, generan el aumento de los asentamientos en

zonas no aptas y el crecimiento de barrios informales asociados con infraestructura deficiente, los cuales están asociados a una mayor riesgo de desastres ante la presencia de inundaciones (Campos *et al.*, 2012).

## **1.9. Gestión del riesgo**

La gestión de riesgo es el proceso planificado, concertado, participativo e integral de reducción de las condiciones de riesgo de desastres de una comunidad, una región o un país. Esto implica la complementariedad de capacidades y recursos locales, regionales y nacionales y está íntimamente ligada a la búsqueda del desarrollo sostenible. También se considera como un conjunto de decisiones administrativas, de organización y conocimientos operacionales para implementar políticas y estrategias con el fin de reducir el impacto de amenazas naturales y desastres ambientales y tecnológicos. De acuerdo con la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (2014), la gestión del riesgo se define como un proceso sistemático para el tratamiento integral de los riesgos, que comprende medidas para identificar, analizar, evaluar y hacer un diagnóstico de los riesgos de una manera sistemática e incluye la comunicación de las amenazas y sus correspondientes riesgos que podrían afectar a una comunidad (Figura 9), así como las medidas pertinentes de respuesta, monitoreo y revisión (Schweizerische Eidgenossenschaft, 2014).

El Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (2012), hace una clasificación de la Gestión de Riesgo de Desastres de la siguiente manera:

- **Prospectiva:** Implica abordar medidas y acciones en la planificación del desarrollo para evitar que se generen nuevas condiciones de riesgo.
- **Correctiva:** Se refiere a la adopción de medidas y acciones de manera anticipada para reducir los riesgos ya existentes.
- **Reactiva:** implica la preparación y respuestas a emergencias.

La construcción inadecuada de infraestructura, la destrucción del medio ambiente, la contaminación, la sobrepoblación de zonas peligrosas, el crecimiento urbano



desordenado y la sobreexplotación y uso irracional de los recursos naturales, son algunas de las vías que la gran mayoría de las ciudades o regiones han seguido para elevar sus niveles de desarrollo, pero al mismo tiempo son factores que han contribuido a incrementar la vulnerabilidad o a acumular una serie de vulnerabilidades a lo largo del tiempo.

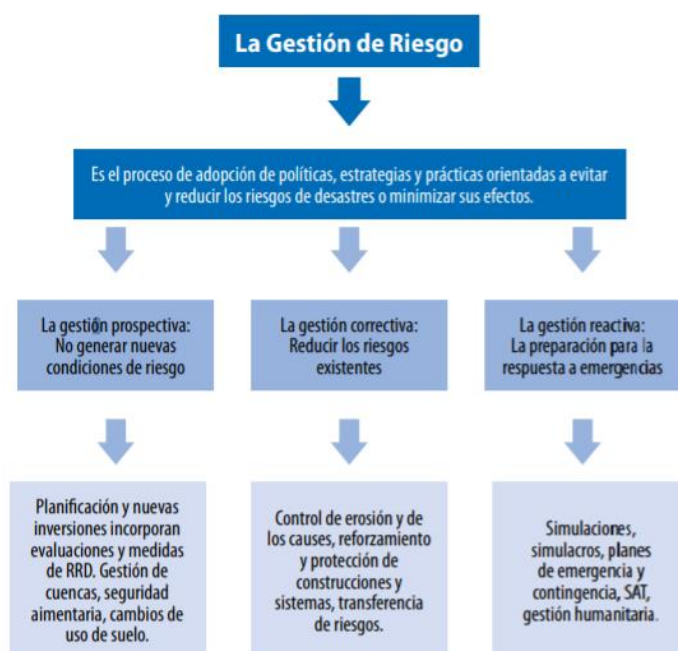


Figura 9. La gestión del riesgo y su clasificación. Fuente: PNUD, 2012

Las etapas de la gestión de riesgo, desde las actividades previas hasta la ejecución de programas de planeación, se describe a continuación (PNUD, 2012):

1. Actividades preliminares. Se identifica, convoca e incorpora a actores clave; definición de principios rectores y criterios de actuación; determinar equipos técnicos de coordinación y ejecución.
2. Comprensión del entorno y de las propias características locales y territoriales en materia de riesgos, estudiando la situación actual y futura en materia de vulnerabilidad y exposición al riesgo, con énfasis en los diversos territorios identificables.

3. Construcción de escenarios (diversos modelos de referencia) sobre amenazas y riesgos territoriales, en función de la probabilidad de ocurrencia y posibilidad de acción.
4. Determinación de objetivos, políticas y programas, que se articulen en torno a un foco prospectivo evitando nuevos riesgos, y tengan una orientación correctiva y reactiva, minimizando las condiciones actuales de riesgo y preparándose para enfrentar las posibles emergencias.
5. Creación de estructuras de gestión para materializar el plan o agenda de gestión de riesgos, identificando actividades, responsables, instancias de coordinación y recursos asociados.
6. Ejecución de programas, proyectos y actividades previamente definidas, que cuenten con el adecuado soporte de estructuras especialmente diseñadas para la operación, así como el monitoreo, control y evaluación.

La reducción del riesgo es un aspecto de orden social, que debe ser visto como la forma en que una comunidad se hace consciente de sus riesgos y en forma autónoma asume la responsabilidad de manejarlos para ir en busca del desarrollo sostenible, ya sea controlando en los casos que se pueda, los riesgos que han sido generados como producto de las actividades del pasado y adoptando estrategias para impedir que en los procesos de desarrollo al futuro se produzcan nuevas situaciones de riesgo que puedan poner en peligro las condiciones de vida y los recursos de las generaciones futuras (Giraldo, 2013)

En América Latina y el Caribe, un importante número de poblaciones se encuentran ubicadas en áreas propensas a la ocurrencia de ciertos fenómenos de la naturaleza, ya sea inundaciones por crecientes de los ríos, deslizamientos en zonas de montaña, terremotos, tormentas tropicales y huracanes en las franjas litorales, y diferentes fenómenos que de alguna manera pueden manifestarse en una zona, y causar efectos a quienes se encuentran en su área de influencia o a los elementos físicos que allí han sido construidos. El incremento en la recurrencia de las amenazas ha venido acompañado de un aumento significativo de las vulnerabilidades, las que se han visto reflejadas en una mayor concentración de

personas en las ciudades, en terrenos que no cumplen con las garantías de seguridad suficientes para su utilización con fines urbanos, además de la difícil y compleja relación de orden social que se genera en los sectores donde hay deficiencia en la prestación de los servicios básicos a la población, tales como: salud, educación, vivienda, transporte, entre otros (ONU, 2020).

## 2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Para conocer las características de la zona de estudio, se define la ubicación del área de interés, las características climatológicas de la cuenca, tendencias de precipitación, temperatura, uso de suelo, tipo de suelo, así como la descripción de estudios previos que se han realizado en relación con el río Sinú a lo largo del tiempo.

### 2.1. Cuenca del río Sinú

La cuenca hidrográfica del río Sinú se localiza en el sector occidental de la Costa Atlántica Colombiana en jurisdicción de los departamentos de Córdoba, Sucre y Antioquia. La cuenca hidrográfica del río Sinú tiene un área aproximada de 13,952.44 km<sup>2</sup> y un perímetro de 857.077 km que se extienden por las divisorias de aguas que la limitan. Dentro del contexto hidrográfico nacional de Colombia, la cuenca hidrográfica del río Sinú es una de las más representativas, y en la Costa Atlántica es la cuenca más extensa propia de un departamento (Figura 10).

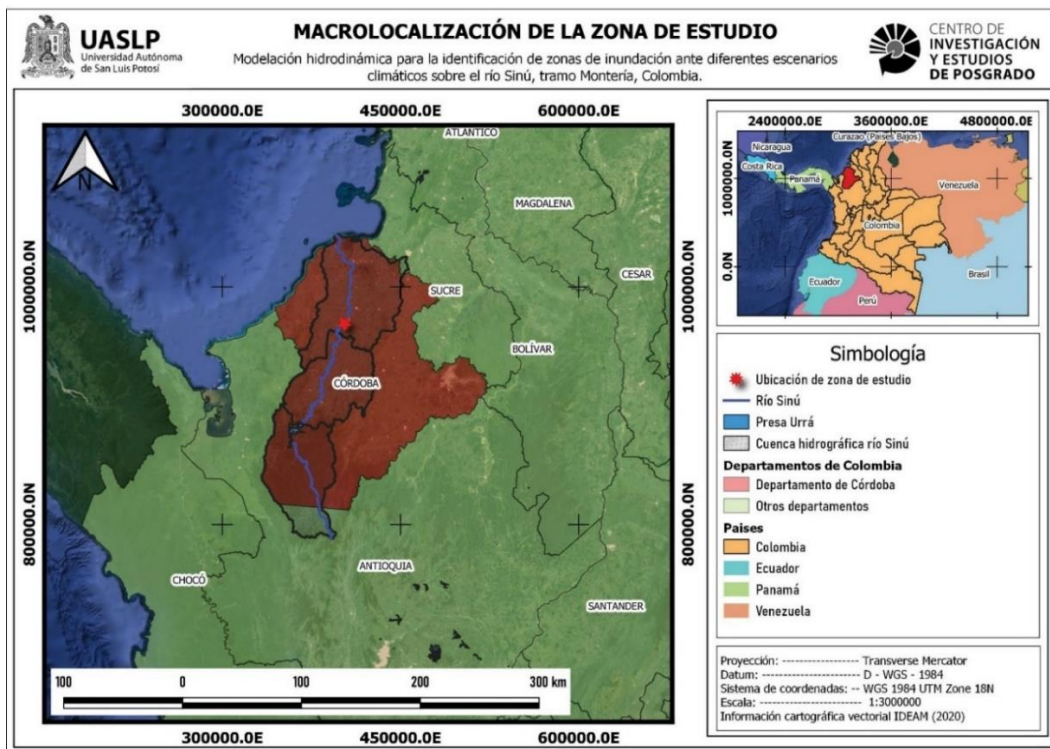


Figura 10. Macrolocalización de la zona de estudio.

El río Sinú nace en el área de páramo del Nudo de Paramillo en el municipio de Ituango, Departamento de Antioquia en la cota 3700 m.s.n.m., pasa por la zona urbana de Montería para continuar su curso hacia la zona del delta de Tinajones, municipio de San Bernardo del Viento, donde descarga hacia el Mar Caribe.

La Corporación Autónoma Regional de Los Valles del Sinú y del San Jorge (CVS), ha sectorizado la cuenca del Río Sinú teniendo en cuenta la ubicación y características físicas y bióticas de la cuenca en tres subregiones: Alto Sinú conformado por los municipios de Tierralta y Valencia; Medio Sinú por Montería, San Carlos, Cereté, San Pelayo y Ciénaga de Oro; y Bajo Sinú colindante a la costa caribeña, desembocando sobre el Mar Caribe (CVS & FONADE, 2009).

Para el presente proyecto, la cuenca de estudio del río Sinú está conformada por los municipios de Tierralta, Valencia y Montería, analizando la cuenca denominada como Medio Sinú, ubicando la boquilla de la cuenca en la zona urbana de Montería, donde se analizará la susceptibilidad de inundaciones ante diferentes escenarios climáticos (Figura 11).



Figura 11. Macrolocalización de la cuenca de estudio.



Figura 12. Localización de la cuenca de estudio.

La cuenca de estudio sobre el río Sinú tiene un área de 4011.60 km<sup>2</sup> y un perímetro de 406.73 km (Figura 12), analizando los escurrimientos aguas abajo de la presa Urrá debido a la escasa información pluviométrica aguas arriba de la presa. Las limitaciones en la adquisición de registros históricos de descargas diarias, mensuales o anuales realizados por la Empresa Urrá, limita la estimación de caudales asociados a diferentes periodos de retorno considerando la presencia de la presa.

## 2.2. Zona de estudio

Para el análisis del tramo de estudio del río Sinú, se identifica el cauce principal del río, que pasa por el departamento de Córdoba, Municipio de Tierralta, cruza el área urbana de Tierralta y el Municipio de Montería hasta llegar a la zona urbana donde se ubica la boquilla de la cuenca.

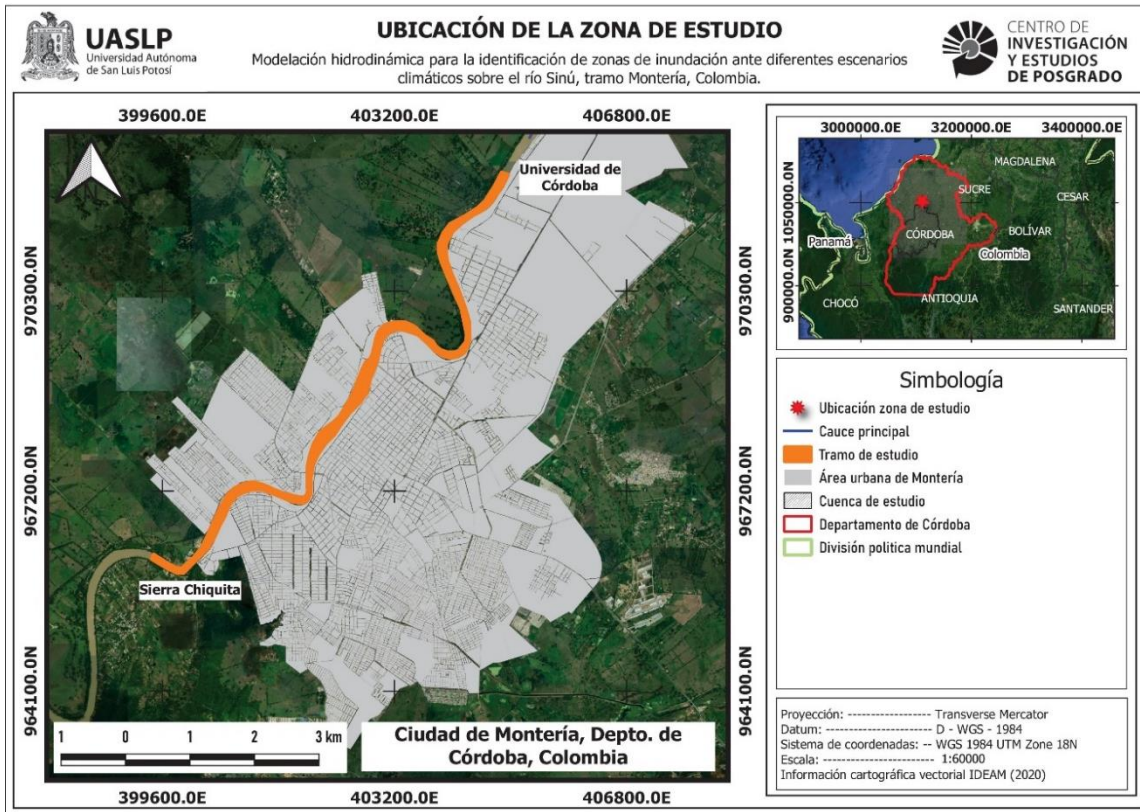


Figura 13. Tramo de estudio sobre el área urbana de Montería, Depto. de Córdoba, Colombia.

El tramo de estudio tiene una longitud aproximada de 11 km, abarcando gran parte de la ciudad de Montería colindante con el río Sinú, desde Sierra Chiquita hasta la Universidad de Córdoba (Figura 13), permitiendo el análisis de la susceptibilidad de inundaciones y puntos críticos de desbordamiento sobre el área urbana.

### 2.3. Hidrografía

La cuenca del río Sinú se constituye como una de las más importante desde el punto de vista de generación de oferta hídrica; aguas arriba del embalse de Urrá I se localizan los principales afluentes del Sinú, muchos de ellos provenientes del Nudo de Paramillo, los cuales son almacenados en la Presa Urrá para la generación de energía eléctrica y la distribución del agua en zonas agrícolas (CVS & FONADE, 2009).

Dentro del área del embalse, y aguas abajo del mismo, existen otros afluentes del río que no representan un aporte de caudal similar, al proveniente de aguas arriba

del embalse, sin embargo, tienen cierta importancia para la recarga de los cuerpos de agua y aporte a zonas agrícolas de la región (Figura 14).

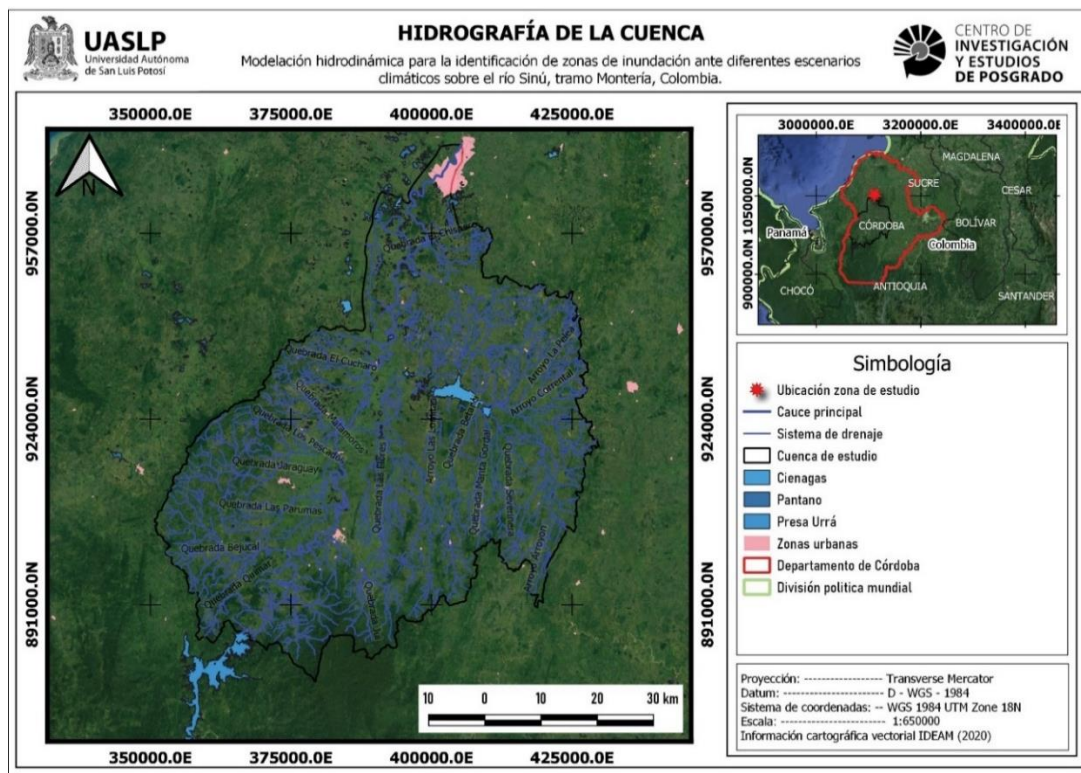


Figura 14. Hidrografía de la cuenca del río Sinú. (Fuente: Elaboración propia)

Los ríos tributarios que se encuentran aguas abajo de la presa Urrá, donde el río Sinú recibe aportes de un gran número de tributario, con menor intensidad, son la Quebrada Pirú, Quebrada Quimar, Quebrada Jiu, el Caño Betancí y Quebrada Las Flores.

La cuenca de estudio se ubica sobre parte de la cuenca hidrográfica de la región del Medio Sinú, desde la Presa Sinú hasta la zona urbana de Montería, Depto. de Córdoba, Colombia, la cual tiene un área de 4011.60 km<sup>2</sup> y un perímetro de 406.73 km, el cauce principal tiene una longitud de 173.52 km, y una pendiente de 0.03%, flujos de suroeste a noreste con presencia de meandros y llanuras de inundación (Figura 14).

Se tiene un sistema de corrientes importantes, con afluentes que van desde ríos de primer orden, hasta formar una corriente de orden seis; para delimitar el parteaguas



de la cuenca se establece el área de aportación del sistema de corrientes, se identifica el cauce más largo, y se delimita sobre un plano horizontal, la divisoria de aguas de acuerdo con la topografía de la zona.

## 2.4. Precipitación

El régimen de precipitación de la cuenca es unimodal, con una temporada seca y una húmeda al año. La época de lluvias se inicia en mayo, y se extiende hasta noviembre, mientras que la época seca, comprende los meses de noviembre hasta abril; en general, el mes más húmedo es junio, y los más secos son enero y febrero.

En la cuenca del Sinú se presentan precipitaciones con lluvias medias anuales, de 2200 mm en el Municipio de Tierralta; a partir de allí descende hasta valores de 1400 mm en el medio Sinú, correspondiente a la zona urbana de Montería, del Departamento de Córdoba (CVS & FONADE, 2009).

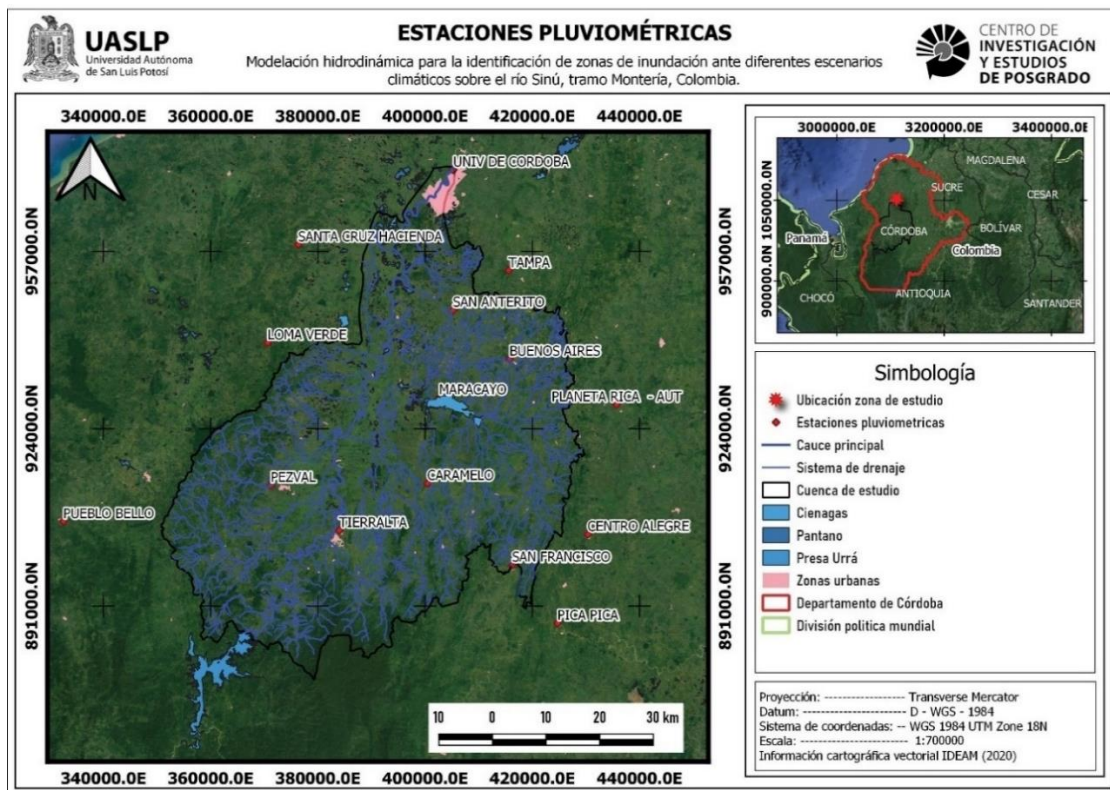


Figura 15. Ubicación espacial de las estaciones pluviométricas analizadas (Fuente: DEAM)

Para el análisis de precipitaciones de la cuenca, se identifican las estaciones que tengan información con registros diarios, mensuales o anuales de lluvias, para seleccionar las estaciones con información suficiente y confiable para el análisis, considerando que estuvieran dentro de la cuenca o cercana a ella.

Se seleccionaron 15 estaciones pluviométricas, y se extrajo información de la precipitación máxima en 24 horas desde 1970 hasta el 2019, descartando las estaciones pluviométricas que tuvieran menos de 20 años, para generar un registro confiable de precipitaciones (Figura 15).

En la figura 16, se muestra información de precipitación anual, para la estación Universidad de Córdoba, la cual tiene un registro desde 1979 hasta 2015, sin embargo, se analizó la información correspondiente al resto de estaciones seleccionadas.

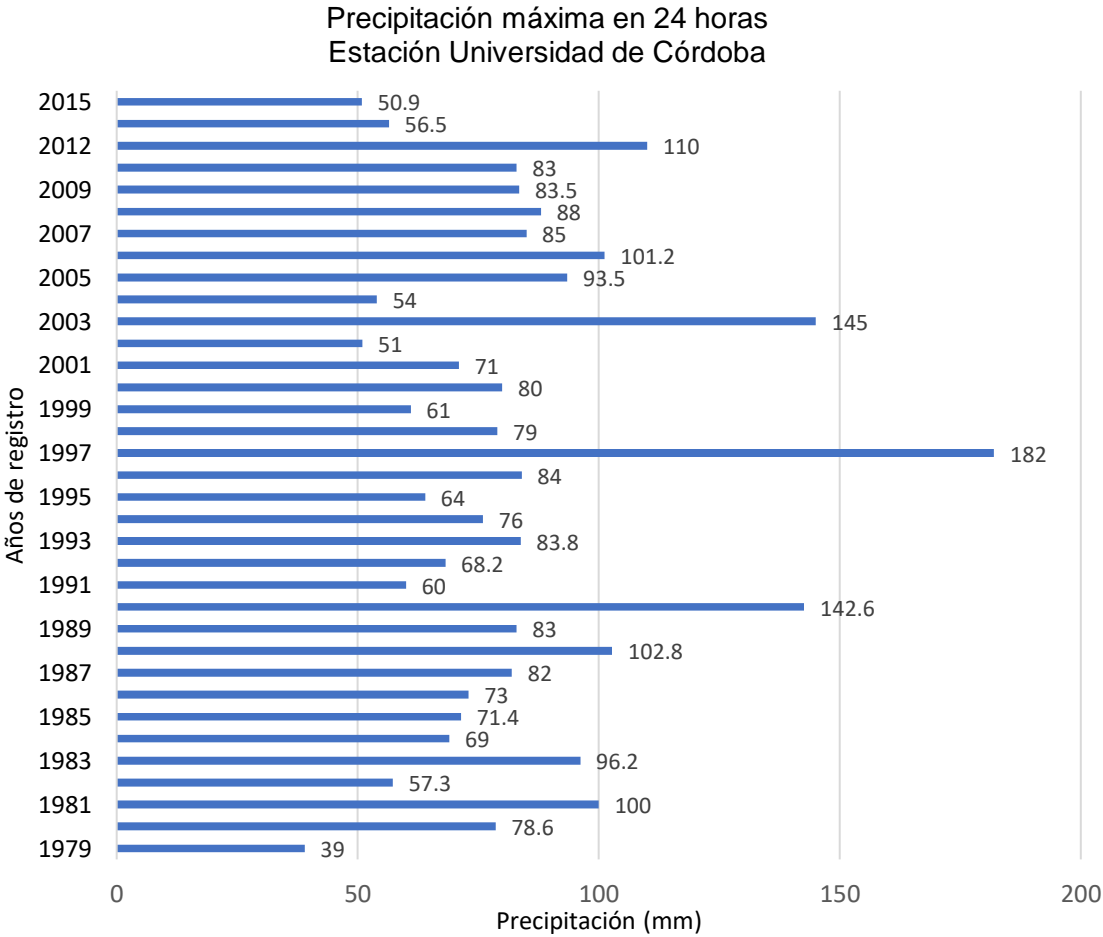


Figura 16. Precipitación máxima en 24 horas - Estación Universidad de Córdoba

## 2.5. Temperatura

La temperatura del aire en la cuenca del río Sinú, es bastante alta, con un promedio anual por encima de los 27.5° C, que varía muy poco anualmente; las variaciones de temperaturas al día son de los 10° C. Se registran las temperaturas promedio más altas en abril (28° C), siendo menores en noviembre (27.2° C).

Las estaciones pluviométricas no cubren el área total de la cuenca, ubicándose principalmente en la zona media y baja del Sinú, hacia la cuenca alta se tienen estaciones en el municipio de Tierralta, por la zona de la presa Urrá. No se tiene registro de estaciones, hacia lo alto del Nudo de Paramillo (CVS & FONADE, 2009).

Se hizo un análisis del comportamiento mensual de las temperaturas, generando una gráfica que muestra la temperatura máxima y mínima promedio sobre Montería durante todo el año (Figura 17).

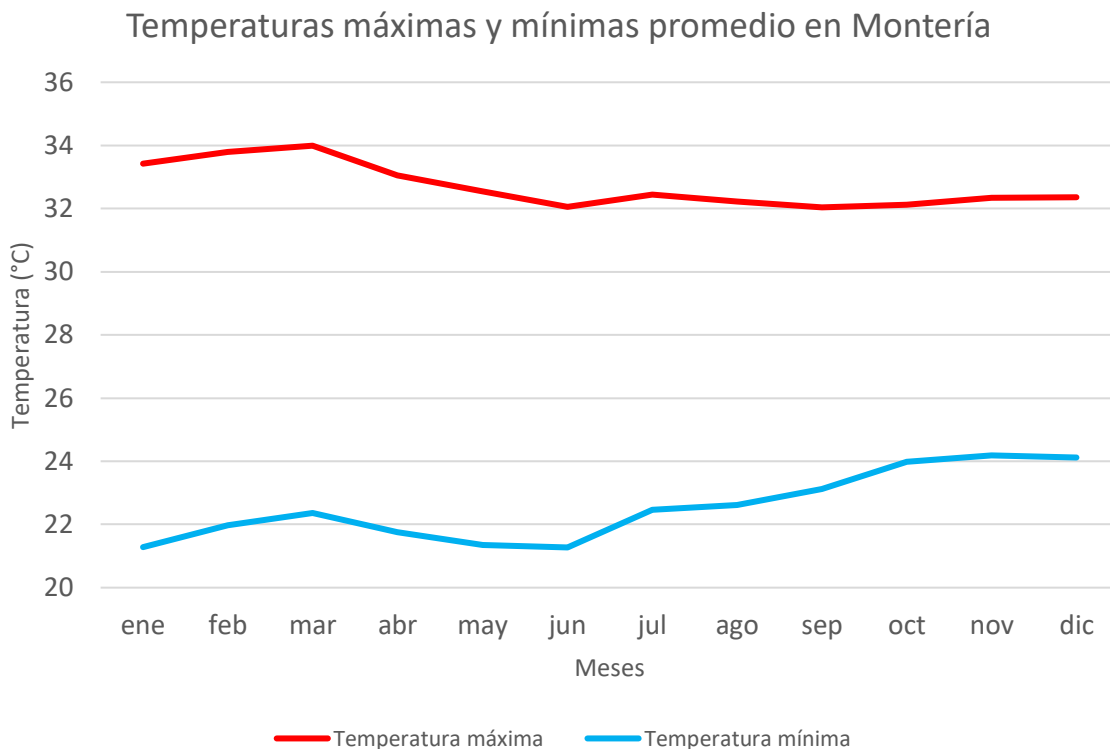


Figura 17. Temperatura máxima y mínima promedio en Montería, Colombia.

## 2.6. Uso de suelo

La cuenca del río Sinú ha sido sometida desde hace varias décadas, a una fuerte presión por la incorporación de sus tierras a las actividades agropecuarias, en diversos grados de explotación.

Se identifican diferentes usos de suelo para la cuenca del río Sinú, mayormente de ganadería y agricultura, observando zonas de amortiguación, debido a un proceso de degradación del medio natural, por el crecimiento de cultivos ilícitos, por lo cual, se definen áreas destinadas a la conservación, protección de márgenes y suelos, encontrando zonas de explotación forestal selectiva, dentro del área de amortiguamiento (CVS & FONADE, 2009). Para la cuenca el río Sinú, la Figura 18 contiene las coberturas de suelo predominantes.

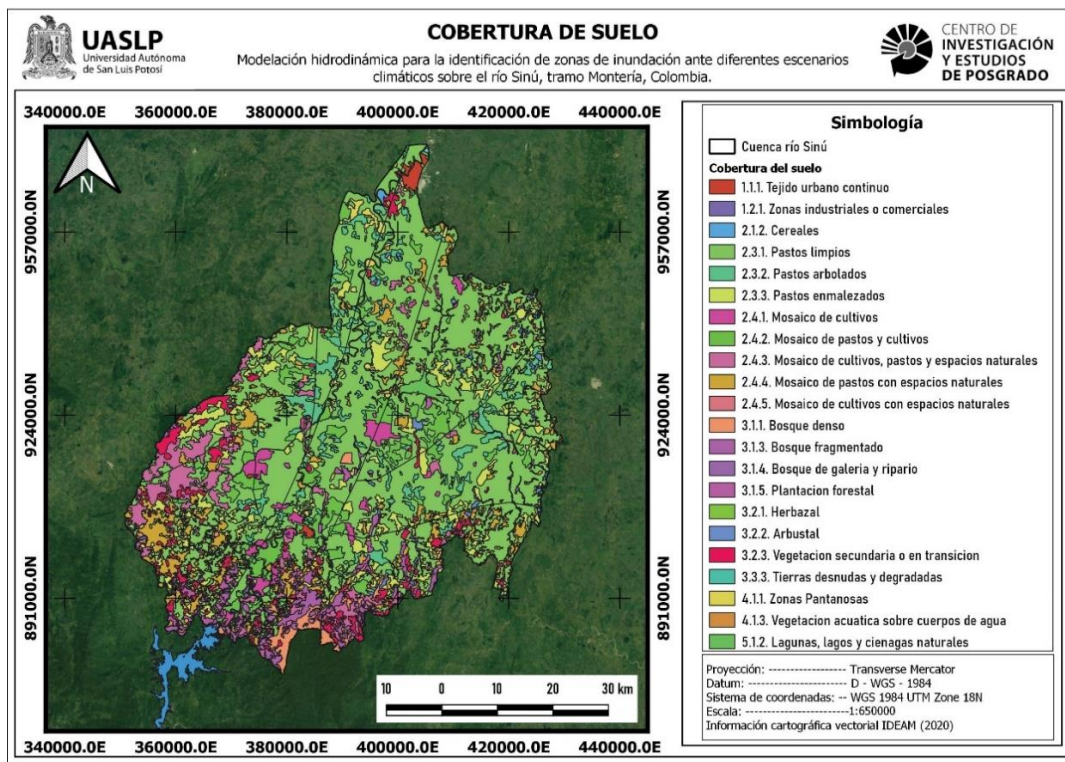


Figura 18. Cobertura de suelo de la zona de estudio.

De manera general, sobre la cuenca de estudio predominan los pastos, cultivos y sistemas agrosilvopastoril, seguido de sitios de protección de producción y forestal, conservación de recursos hídricos, cuerpos de agua y zonas urbanas.

## 2.7. Edafología

Los suelos son el medio en donde las plantas obtienen los nutrientes, que requieren para su desarrollo; por tanto, el conocimiento que se tenga de las características morfológicas, físicas y químicas de este elemento, es de capital importancia para planear su uso más racional, especialmente en las actividades relativas a la explotación agrícola, y pecuaria y en las labores de reforestación. El suelo tiene algunas propiedades físicas, que permiten un mejor o peor drenaje interno; este aspecto es necesario conocerlo, al decidir el tipo de prácticas que habrán de llevarse a cabo, si se quiere aprovechar este elemento de manera racional (INEGI, 2015).

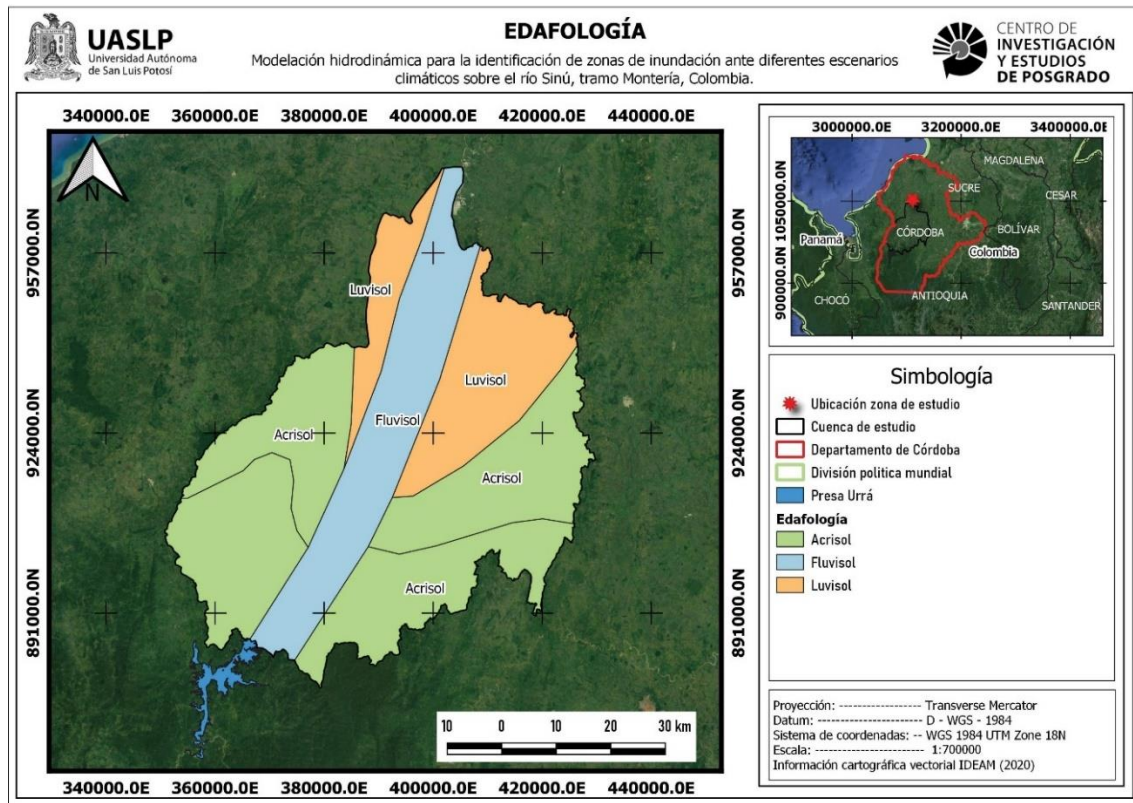


Figura 19. Edafología de la zona de estudio.

Acorde con la zonificación de los principales tipos de suelos sobre Colombia, generada por la FAO, la cuenca en estudio está compuesta por Fluvisoles, Acrisoles y Luvisoles (Figura 19).

De acuerdo con la Guía para la interpretación de la Cartografía Edafología, Serie II, elaborada por el INEGI (2015), en la Tabla 1 se describen a los grupos de suelo predominantes de la siguiente manera:

Tabla 1. Descripción del tipo de suelo sobre la cuenca de estudio.

Tipo de suelos	Características	Área (km <sup>2</sup> )
Acrisoles	Del latín <i>acris</i> , muy ácido. Son suelos con arcillas de baja actividad y que no son fértiles en general para la agricultura. Muy susceptibles a la erosión por deforestación. Se caracterizan por sus colores rojos o amarillos claros con manchas rojas y por ser muy ácidos, pH generalmente debajo de 5.5 donde la mayoría de los nutrientes no son disponibles para la mayoría de los cultivos tradicionales, salvo el cacao, café y piña; por ello su uso más adecuado es forestal.	893.594 (21.27 %)
Fluvisoles	Del latín <i>fluvius</i> , río. Son suelos con abundantes sedimentos fluviales, marinos o lacustres en periodos recientes y que están tradicionalmente sobre planicies de inundación, abanicos de ríos o marismas costeras. Tienen buena fertilidad natural y son atractivos históricamente para los asentamientos humanos. Los Fluvisoles con influencia de marea son suelos ecológicamente valiosos en los que la vegetación original debe preservarse.	2247.232 (56.02 %)
Luvisoles	Del latín <i>luere</i> , lavar. Son suelos rojos, grises o pardos claros, susceptibles a la erosión especialmente aquellos con alto contenido de arcilla y los situados en pendientes fuertes. Los Luvisoles son generalmente fértiles para la agricultura.	870.773 (21.71 %)
<b>Total</b>		<b>4011.60</b> <b>(100 %)</b>

La información edafológica corresponde al conjunto de datos vectoriales, que muestra la distribución de los principales tipos de suelo a nivel mundial, así como los atributos físicos, químicos y limitantes físicas y químicas presentes, de acuerdo con la base referencial mundial del recurso suelo de la FAO (WRB por sus siglas en inglés).

## 2.8. Estudios previos

Por la importancia hídrica que representa la cuenca del río Sinú, siendo motivo de estudio en ámbitos ambientales, económicos, geomorfológico, hidrológico e hidráulico, buscando la conservación de la calidad del agua y la vulnerabilidad climática, es de gran importancia ampliar el conocimiento de la cuenca, para conocer su comportamiento y entender su influencia en el ambiente.

En el estudio desarrollado por Ospina J., *et al.* (2009). “*Vulnerability of water resources in the face of potential climate change: generation of hydroelectric power in Colombia*” identifica algunas variables climáticas, que muestran la vulnerabilidad de los recursos hidrológicos a nivel de la cuenca Sinú – Caribe, utilizando modelos numéricos para una simular sistemas del agua, y analizar la incidencia del potencial de cambio climático, sobre el sector hidroeléctrico. Los resultados de este estudio señalaron un aumento en la temperatura mínima, media y máxima antes de finales de siglo, en rangos de 1.3°C a 2.5°C. Encontrando también, una relación en la disminución en la generación de energía eléctrica, el aporte de caudal al río Sinú y la disminución del volumen almacenado en la presa Urrá para el año 2039.

Se elaboró un estudio por Arroyave Diana, *et al.* (2013), “Estudio del modelamiento de la calidad del agua del río Sinú, Colombia” donde se generó un modelo de calidad del agua sobre el río Sinú, desde la central hidroeléctrica Urrá hasta la desembocadura sobre el mar Caribe, utilizando el modelo QUAL2KW para el análisis de la calidad del agua, a través de la caracterización hidráulica, segmentación del río y seleccionando los parámetros de calidad del agua de mayor sensibilidad, buscando calibrar el modelo y poder predecir el comportamiento de la calidad del agua sobre el río Sinú.

A partir del análisis del riesgo asociado a las amenazas de inundaciones y erosión fluvial, que aumenta en la temporada invernal, la Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y del San Jorge (2018), desarrolla el estudio denominado “Plan de acción para la temporada invernal, en el departamento de Córdoba – PATI CSV”, que permite a los tomadores de decisiones, entender los conceptos generales

asociados al tema de temporada invernal, tener un resumen de la última temporada de lluvias en el territorio colombiano, y conocer las acciones establecidas por la CVS, para enfrentar la temporada invernal, así como protocolos de actuación y el directorio de contactos, para establecer comunicación, alertas y respuesta ante amenazas asociadas a la temporada invernal.

Se ha elaborado un “Plan de Manejo y Ordenamiento de la Cuenca Hidrográfica del río Sinú”, por parte del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia, en colaboración con la Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y del San Jorge (2004), donde se definen los instrumentos y directrices, para ordenar las acciones sobre la cuenca, y lograr un uso sostenible de sus recursos naturales. Dentro de este estudio se realiza un diagnóstico ambiental de la cuenca del río Sinú, una prospección para identificar los problemas presentes, se definen los objetivo, metas, programas, proyectos y estrategias para la ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica, se elabora un plan operativo y da seguimiento para evaluar el cumplimiento del plan sobre la cuenca del río Sinú.

A nivel socioeconómico, se cuenta con un estudio elaborado por Acosta Karina (2013), denominado “La economía de las aguas del río Sinú”, donde se exalta la importancia del río Sinú, a través de la caracterización del aprovechamiento económico de las áreas dependientes del río, la creación de actividades económicas, por la riqueza natural del sitio, así como los cambios e impactos ambientales y sociales, acontecidos en la región del Sinú. Se hace una descripción de los antecedentes históricos de la región del Sinú, los primeros asentamientos y la migración en la zona. Se describen las características de la cuenca, su orografía, la presión hídrica y la regionalización del departamento de Córdoba por su aspecto hídrico, así como las principales actividades económicas en torno al río Sinú.

Otro estudio surge de Correa Orlando, *et al.* (2021) denominado “Vulnerabilidad por erosión fluvial: caso del corregimiento de Palo de Agua, Municipio de Lorica, Departamento de Córdoba, Colombia” donde se evalúa la vulnerabilidad de Palo Alto, ubicado en las colindancias del río Sinú, aplicando una metodológica de enfoque mixto con entrevistas a actores clave y cálculos cuantitativos, para evaluar



la vulnerabilidad total, física, ambiental económica y social, a partir del visitas de campo, y del análisis de procesos de erosión fluvial en puntos críticos.

De manera general, sobre la cuenca del río Sinú, existen varios estudios sociales, ambientales, económicos, hidrológicos e hidráulicos, que permiten entender el comportamiento del cauce y sus afluentes, analizar y predecir la calidad del agua, presentando información para validar modelos numéricos, y predecir el comportamiento del cauce, así como analizar la susceptibilidad ante inundaciones en caso de lluvias extremas.

### **3. ESTUDIO HIDROLÓGICO DE LA CUENCA DEL RÍO SINÚ**

Los estudios hidrológicos son herramientas basadas en la hidrología aplicada, los cuales implementan análisis cuantitativos para determinar la disponibilidad de fuentes naturales, conocer el abastecimiento de la fuente adecuado para determinado proyecto, si se requieren otras estructuras para disponer de volúmenes excedentes de agua, y estimar eventos de diseño para proyectar, construir o supervisar las obras hidráulicas de interés (Campos-Aranda, 1998).

En este proyecto, el estudio hidrológico sobre la cuenca del río Sinú, tiene como objetivo estimar los caudales asociados a diferentes periodos de retorno, que pueden presentarse sobre el tramo de estudio, en la ciudad de Montería, para determinar la susceptibilidad de inundaciones sobre la zona urbana.

Para entender las bases conceptuales sobre el estudio hidrológico, se describen conceptos como el ciclo hidrológico y la cuenca hidrográfica, así como parámetros físicos de la cuenca.

#### **3.1. Ciclo hidrológico**

El ciclo hidrológico involucra un proceso de transporte recirculatorio e indefinido o permanente (Figura 20), este movimiento permanente del agua se debe fundamentalmente a dos causas: la primera, el sol que proporciona la energía para elevar el agua (evaporación); la segunda, la gravedad terrestre, que hace que el agua condensada descienda provocando la precipitación y escurrimiento (Campos-Aranda, 1998).

El ciclo hidrológico es la base para entender el comportamiento y circulación del agua, su entendimiento es la base para el desarrollo de estudios hidrológicos, y la estimación de los caudales, tomando en cuenta las consideraciones del flujo y circulación del agua sobre la cuenca.

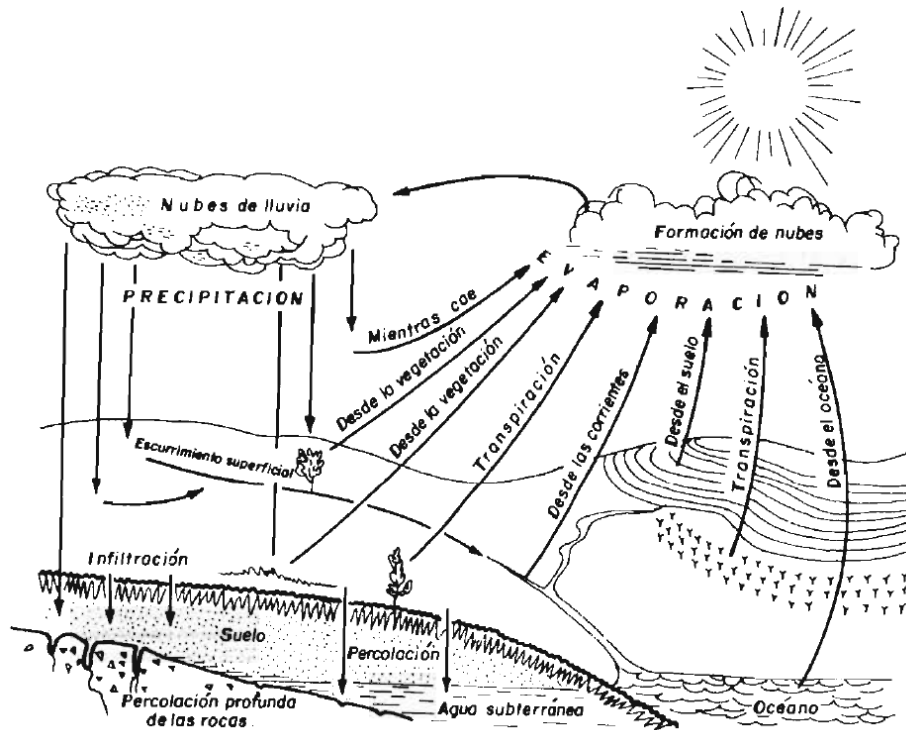


Figura 20. Representación descriptiva del ciclo hidrológico (W. C. Ackermann, E. A. Coleman, 1955)

### 3.2. Cuenca hidrográfica

Una cuenca es una zona de la superficie terrestre en donde (si fuera impermeable,) las gotas de lluvia que caen sobre ella, tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida (Aparicio, 1992).

Las cuencas hidrográficas actúan como un sistema hidrológico individual, recibiendo la precipitación y transformándola a pérdidas, principalmente infiltración y evaporación, escurrimiento en su salida. Las cuencas son unidades comunes, utilizadas para modelar procesos hidrológicos, estimar componentes fundamentales de sus balances hidrológicos, e impactos de las actividades del hombre en los sistemas hidrológicos.

Las cuencas son también unidades naturales morfológicas en las cuales operan los procesos fluviales, de los ríos y fluvio-glaciares. Estos procesos son dinámicos y están ligados a los hidrológicos, de manera que, estos últimos actúan sobre los primeros, definen las formas del terreno, los suelos, la red de drenaje, niveles

freáticos, etc., y por ello, se modifican los procesos hidrológicos, principalmente los asociados a los escurrimientos.

Los parámetros físicos de las cuencas tienen cierta influencia en su respuesta hidrológica, e incluso existe cierta reciprocidad en el sentido que su régimen hidrológico, contribuye a formar tales características. Esta interrelación alienta a buscar mecanismos de predicción de la respuesta hidrológica, a partir de parámetros físicos fácilmente calculables (Campos-Aranda, 2007).

### 3.3. Geomorfología de la cuenca

#### 3.3.1. Delimitación de parteaguas

Para definir la cuenca de estudio, se identificaron los ríos, afluentes y cuerpos de agua, delimitando la cuenca o parteaguas, a partir de la topografía del sitio e integrando las variables, para conocer las características y comportamiento de los escurrimientos sobre la cuenca.



Figura 21. Delimitación de la cuenca del río Sinú.

El parteaguas es una línea imaginaria que muestra el contorno de la cuenca, delimita el área de captación del escurrimiento producto de la precipitación, hacia un cuerpo de agua o corriente que fluye hacia la salida de la cuenca (Figura 21). Para delimitar el parteaguas, se definen los ríos, afluentes o escurrimientos superficiales y utilizando información topográfica, se identifica el contorno de la cuenca.

### 3.3.2. Tamaño y tipo de cuenca

El área de una cuenca se define como la superficie, en proyección horizontal, delimitada por el parteaguas (Aparicio, 1992). La Tabla 2 muestra el área y perímetro de la cuenca de estudio.

Tabla 2. Área y perímetro de la cuenca de estudio.

Descripción	Área (km <sup>2</sup> )	Perímetro (km)
Cuenca río Sinú	4,011.60	406.729

Los tamaños relativos de estos espacios hidrológicos se definen o determinan, aunque no de manera rígida, mediante los nombres de microcuenca, subcuenca o cuenca, de acuerdo con la Tabla 3:

Tabla 3. Clasificación de las cuencas (Campos Aranda, 1992).

Unidad hidrológica	Área (km <sup>2</sup> )	Descripción
Microcuenca	< 25	Muy pequeña
Microcuenca - Subcuenca	25 a 250	Pequeña
Subcuenca	250 a 500	Intermedia – pequeña
Cuenca	500 a 2500	Intermedia – grande
Cuenca	2500 a 5000	Grande
Cuenca	> 5000	Muy grande

La cuenca de estudio que abarca el cauce principal del río Sinú, desde la Presa Urrá hasta la zona urbana de Montería, Departamento de Córdoba, Colombia, de acuerdo con la clasificación de cuencas, Campos Arandas (1992), corresponde a una Cuenca Grande.

### 3.3.3. Coeficiente de compacidad

El coeficiente de compacidad fue definido por H. Gravelius, como el coeficiente adimensional entre el perímetro de la cuenca (P) y la circunferencia (Pc) con área de igual tamaño (A) de la cuenca en km<sup>2</sup>, es decir:

$$Cc = \frac{P}{P_c} = \frac{P}{2\pi \left(\frac{A}{\pi}\right)^{1/2}}$$

El coeficiente de compacidad tiene como límite inferior la unidad, indicando que la cuenca es circular, presentado una tendencia a concentrar fuertes volúmenes de agua producto de escurrimientos, y conforme su valor crece indica una mayor distorsión de forma, volviéndose alargada o asimétrica (Campos-Aranda, 1998).

De acuerdo la Tabla 4, clasificación de Villela y Mattos (1975), se describen las formas que pueden adaptar las cuencas de acuerdo con el coeficiente de compacidad.

Tabla 4. Clasificación de la cuenca de acuerdo con el coeficiente de compacidad (Villela y Mattos, 1975).

Índice de compacidad	Forma de la cuenca
1.00 – 1.25	Circular
1.25 – 1.50	Ovalada
1.50 – 1.70	Oblonga
> 1.70	Larga

Al aplicar la fórmula correspondiente al coeficiente de compacidad para determinar la forma de cuenca del río Sinú, en la Tabla 5 se muestra el valor obtenido y la clasificación correspondiente a la zona de estudio.

Tabla 5. Índice de compacidad para la cuenca de estudio.

Descripción	Coeficiente de compacidad	Clasificación de forma
Cuenca río Sinú	1.81	Larga

De acuerdo con la clasificación anterior, los resultados correspondientes al coeficiente de compacidad de la cuenca del río Sinú (Tabla 5), se puede concluir que la cuenca de estudio coincide con una **cuenca de forma alargada**.

### 3.3.4. Curva hipsométrica

La curva hipsométrica es una curva que representa en ordenadas, las elevaciones de la cuenca, que se ubica a partir de las superficies de descarga o salida en abscisa. La distribución espacial de la altitud en la cuenca, es fundamental para caracterizar la morfológica, y saber qué porcentaje de la cuenca corresponde a zonas montañosas, lomeríos, planicies, u otro (Breña & Jacobo, 2006).

Para su construcción, se requiere determinar el valor de área correspondiente a un intervalo de altitud, abarcando el rango comprendido entre las elevaciones del terreno mínima y máxima. El intervalo de altitud se define de las condiciones topográficas de cada cuenca. Una vez obtenida la relación área - altitud se obtiene la curva hipsométrica de la cuenca, que corresponde a una curva acumulada que parte de la elevación mínima del terreno o de la salida de la cuenca de estudio (Breña & Jacobo, 2006).

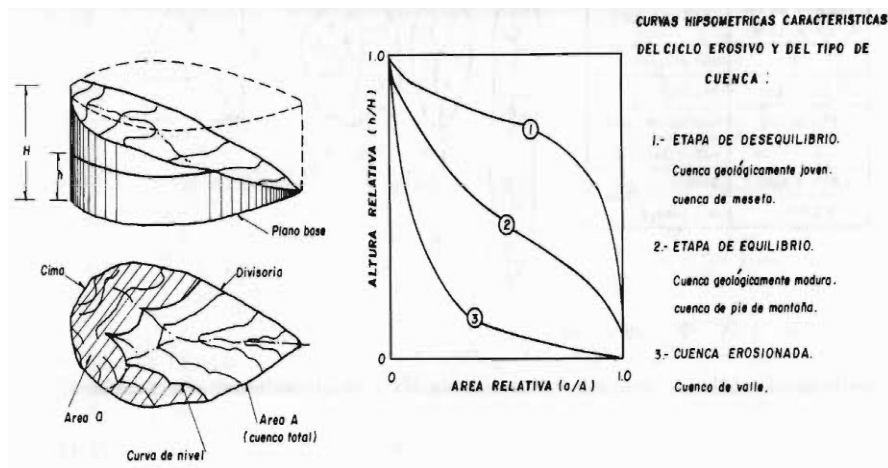
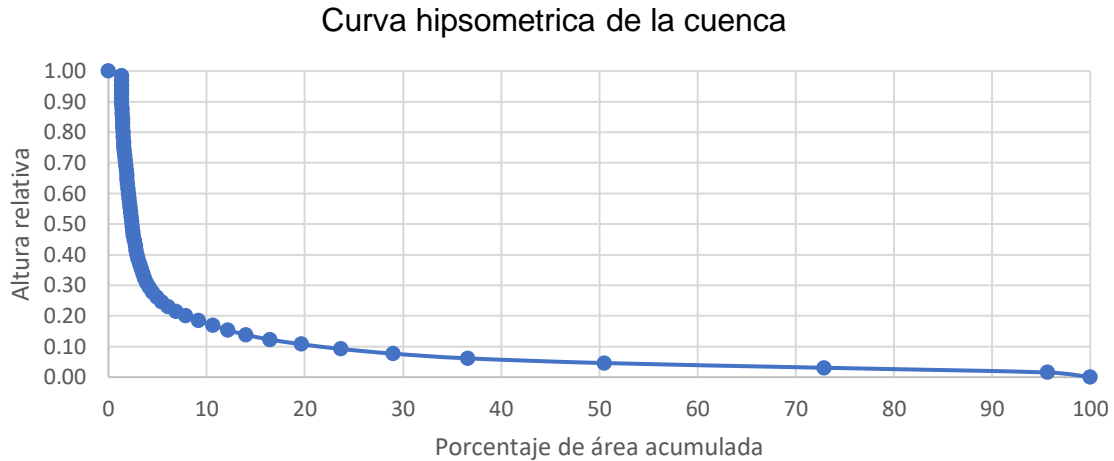


Figura 22. Análisis hipsométrico en función del tipo de cuenca y su ciclo erosivo (Campos Aranda, 1998).

Un análisis comparativo de las curvas hipsométricas, permite determinar el tipo de cuenca y las características del ciclo erosivo (Figura 22), en función del comportamiento de la curva resultante (Campos-Aranda, 1998).

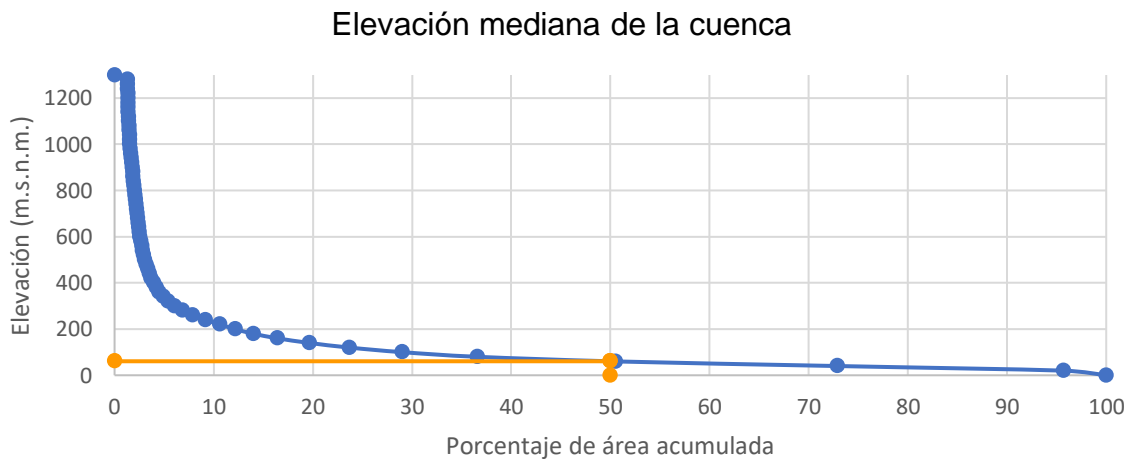


*Figura 23. Curva hipsométrica de la cuenca del río Sinú.*

De acuerdo con los resultados obtenidos en la curva hipsométrica (Figura 23), y el análisis comparativo del tipo de cuenca y características del ciclo erosivo, se puede identificar a la cuenca del río Sinú, como una **cuenca erosionada, tipo valle**.

### 3.3.5. Elevación mediana

A partir de la curva hipsométrica, se determina la elevación mediana de la cuenca, la cual, equivale a la cota correspondiente al 50% del área de cuenca (Campos-Aranda, 1998). El análisis correspondiente a la cuenca del río Sinú, a partir de los resultados de la curva hipsométrica, muestra una elevación mediana de la cuenca de 60.7 m.s.n.m., cuya representación gráfica, se muestra en la Figura 24.



*Figura 24. Elevación mediana de la cuenca del río Sinú.*



### 3.3.6. Pendiente de la cuenca

La pendiente de la cuenca tiene una importante pero compleja relación con la infiltración, el escurrimiento superficial, la humedad del suelo y la contribución del agua subterránea al flujo en los cauces. Es uno de los factores físicos que controlan el tiempo del flujo sobre el terreno, y tiene influencia directa en la magnitud de las avenidas o crecidas (Campos-Aranda, 1998).

Para estimar la pendiente de la cuenca, uno de los criterios utilizados corresponde al Criterio de J.W. Alvord, donde se utiliza la siguiente formula:

$$Sc = \frac{D * L}{A}$$

Donde

A= área de la cuenca en km<sup>2</sup>

D= desnivel entre curvas de nivel

L= longitud de las curvas de nivel km

Al aplicar la formula anterior, utilizando el área, desnivel y longitud de las curvas de nivel de la cuenca del río Sinú, se registra un valor de **0.111 o 11.1%** correspondiente a la pendiente de la cuenca de estudio.

### 3.3.7. Relación de elongación

Se define como el coeficiente adimensional entre el diámetro (D) de un círculo que tiene igual área (A) que la cuenca y la longitud (Lc) de la misma. La longitud Lc se define como la más grande dimensión de la cuenca, a lo largo de una línea recta desde la salida hasta la divisoria, paralela al cauce principal. La fórmula desarrollada por S.A. Schumm para obtener este coeficiente, se muestra como:

$$Re = \frac{D}{Lc} = 1.1284 \frac{\sqrt{A}}{Lc}$$

El coeficiente varía entre 0.6 y 1 para una amplia variedad de climas y geologías. Además, está correlacionado con el relieve de la cuenca, de manera que valores cercanos a la unidad son típicos de regiones con relieve bajo, en cambio, donde

varía de 0.6 – 0.8 está asociado a fuertes relieves y pendientes pronunciadas del terreno (Campos-Aranda, 1998).

Al aplicar la fórmula de relación de elongación para la cuenca de estudio, se registra un valor de **0.75**, asociado a fuertes relieves y pendientes pronunciadas, con tendencia a la unidad que se asocia con relieves bajos.

### 3.4. Geomorfología de los cauces

#### 3.4.1. Red de drenaje

Se llama red de drenaje de la cuenca, al sistema de cauces donde fluyen los escurrimientos superficiales, subsuperficiales y subterráneos, de manera temporal o permanente. Su importancia se manifiesta por sus efectos en la formación y rapidez de drenado de los escurrimientos, además de proporcionar indicios sobre las condiciones físicas del suelo y de la superficie de la cuenca (Breña & Jacobo, 2006).

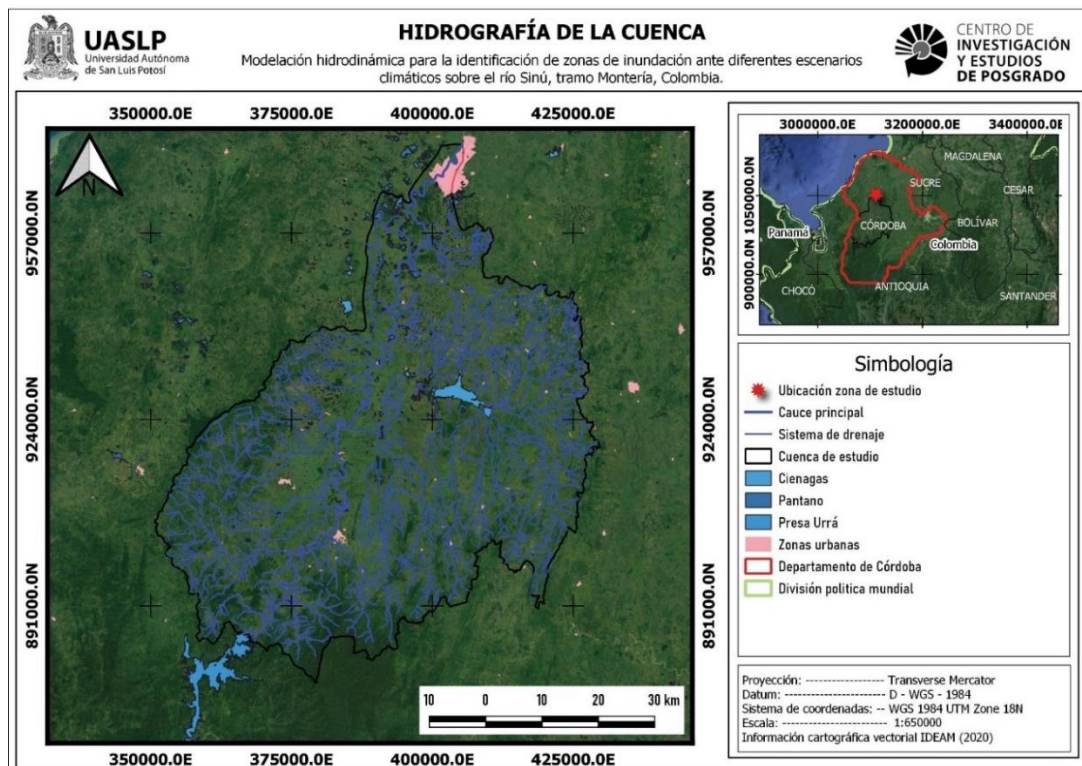


Figura 25. Red de drenaje y cauce principal.

El cauce principal de la cuenca del río Sinú, tiene una longitud de 173.52 km desde la boquilla de la cuenca hasta la presa Urrá (Figura 25), donde inicia el análisis de la cuenca. Sus corrientes se clasifican como perennes por conducir agua durante todo el año, presentado meandros sobre el cauce principal y sus afluentes.

Desde el punto de vista de su salida, la cuenca se considera clasifica como exorreica (abierta) al ubicarse su punto de salida en los límites de la cuenca y su descarga se vierte sobre una corriente.

### **3.4.2. Orden de corrientes**

El orden de corrientes es una clasificación que refleja el grado de ramificación o bifurcación dentro de una cuenca. De acuerdo con R.E. Horton, se clasificó el orden de corrientes asignando el orden 1 a las corrientes que no están ramificadas; el orden 2 a las corrientes que sólo tienen ramificaciones de primer orden; de orden 3 aquéllas con dos o más tributarios de orden 2; y así sucesivamente hasta identificar todos los afluentes. El orden de la corriente principal será un indicador de la magnitud de la ramificación y extensión de la red de drenaje dentro de la cuenca (Campos-Aranda, 1998).

El análisis de los afluentes sobre la cuenca de estudio permitió identificar un sistema de ramificaciones donde la corriente principal es de orden 6, considerando los afluentes desde la ciudad de Montería hasta la Presa Urrá.

### **3.4.3. Densidad de drenaje**

La densidad de drenaje ( $Dd$ ) se define como la longitud total ( $Lt$ ) de los cauces dentro de la cuenca, dividida entre el área total de drenaje ( $A$ ). Es un concepto debido a R.E. Horton, donde la formula se describe a continuación:

$$Dd = \frac{Lt}{A}$$

Se ha identificado bajas densidades de drenaje en regiones de rocas resistentes o suelos permeables con vegetación densa y donde el relieve es débil. En cambio, se

obtienen altas densidades de drenaje en áreas de rocas débiles o de suelos impermeables, vegetación escasa y relieve montañoso (Campos-Aranda, 1998).

Al analizar la densidad de drenaje de la cuenca del río Sinú, se obtiene una densidad de drenaje baja correspondiente a un valor de 0.75, que coincide con regiones de relieve débil que se encuentran sobre la zona de estudio.

#### **3.4.4. Pendiente el cauce principal**

La pendiente del cauce principal se relaciona con las características hidráulicas del escurrimiento, en particular, con la velocidad de propagación de las ondas de avenida y con la capacidad de transporte de sedimentos (Campos-Aranda, 1998). Para estimar la pendiente del cauce principal, se puede considerar alguno de los siguientes criterios.

#### **3.4.5. Método simplificado**

Este criterio consiste en dividir el desnivel del río entre su longitud, expresado mediante la siguiente formula:

$$S_1 = \frac{H}{L}$$

El análisis de la pendiente simplificada aplicado al cauce principal del río Sinú, registra una diferencia de elevaciones (H) de 100 metros, obtenidos de ubicar la cota con mayor elevación de 120 metros menos la cota con menor elevación de 20 metros. La longitud del cauce principal (L) corresponde a 173.52 km. Aplicando la formula anterior, se tiene la siguiente pendiente.

$$S_1 = \frac{100 \text{ metros}}{173,517.929 \text{ metros}} = 0.0006 = 0.06\%$$

De acuerdo con los resultados de la pendiente, se puede clasificar la topografía del terreno, según valores propuestos por R. Heras R., citados en la siguiente tabla (Campos-Aranda, 1998):

Tabla 6. Clasificación del relieve en función de pendiente (R. Heras R.)

Pendiente (S <sub>1</sub> ), en porcentaje	Tipo de terreno
2	Llano
5	Suave
10	Accidentado medio
15	Accidentado
25	Fuertemente accidentado
50	Escarpado
>50	Muy escarpado

La pendiente del cauce principal del río Sinú, aplicando el método simplificado, corresponde a 0.06% que, de acuerdo con la Tabla 6. Clasificación del relieve en función de la pendiente, se considera que el cauce se ubica sobre un terreno Llano.

#### 3.4.6. Método de reducción de porcentajes

Este método consiste en dividir el desnivel del cauce entre sus puntos a 10% y 85% de su longitud total (H'), a partir de la salida o punto de interés, entre el recorrido del río dentro de tales puntos. Entonces, el 15% del tramo de río con fuerte pendiente y el 10 % de su parte plana, son excluidos. La fórmula para aplicar este criterio, es la siguiente (Campos-Aranda, 1998):

$$S'_1 = \frac{H'}{0.75L}$$

En relación con el cauce principal del río Sinú, se tiene una elevación H1 de 23.9 m.s.n.m. en el 10% de la longitud total y una elevación H2 de 66.6 m.s.n.m. en el 15% del tramo del río con mayor pendiente, obteniendo una elevación H'=H2-H1 correspondiente a 42.6 m.s.n.m. para aplicarse sobre la fórmula anterior. La longitud del cauce principal total corresponde a 173.52 km.

La pendiente obtenida mediante el método de reducción de porcentajes, al sustituir las variables en la fórmula es igual a 0.033%.

### 3.4.7. Método de Taylor y H.E. Schwarz

Este criterio permite obtener la pendiente promedio del cauce principal, considera al tramo de estudio formando una serie de canales de pendiente uniforme, en los cuales el tiempo de recorrido del agua es igual al del tramo (Campos-Aranda, 1998).

El cálculo de la pendiente por el método de Taylor – Schwartz, es el siguiente:

$$S = \left[ \frac{L}{\frac{l_1}{\sqrt{S_1}} + \frac{l_2}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{l_m}{\sqrt{S_m}}} \right]^2$$

Donde

S = pendiente media de la corriente de mayor orden

m = número de segmentos en que se divide el cauce principal

L= longitud horizontal del cauce principal, desde su nacimiento como corriente de orden uno hasta la salida de la cuenca

l<sub>m</sub> = longitud horizontal de los tramos en los cuales se subdivide el cauce principal

S<sub>m</sub> = pendiente de cada segmento, en que se divide el cauce principal

Aplicando la formula anterior, se puede calcular la pendiente media del cauce del río Sinú, dividiendo el cauce en tramos de igual elevación, utilizando la Tabla 7 para el cálculo de la pendiente.

Tabla 7. Cálculo para determinar la pendiente de Taylor - Schwarz

No.	Distancia del Tramo (m)	Estación (Km)	Desnivel (m.s.n.m.)	S <sub>m</sub>	Raíz (S)	L/Raíz (S)
1	87986.885	87.987	20	0.0002	0.0151	5835954.75
2	49127.613	137.114	20	0.0004	0.0202	2434857.20
3	31656.25	168.771	20	0.0006	0.0251	1259430.48
4	4598.352	173.369	20	0.0043	0.0659	69724.96
6	148.829	173.518	20	0.1344	0.3666	405.99
<b>Suma</b>	173517.929	<b>Desnivel</b>	100		<b>Suma</b>	9600373.41
	<b>Pendiente</b>	0.000326672		<b>Pendiente (%)</b>	0.033	

La pendiente media del cauce mediante el método e Taylor y H.E. Schwarz (Tabla 26) corresponde a 0.033%. La siguiente figura muestra el perfil del cauce principal asociado a la cuenca de estudio.

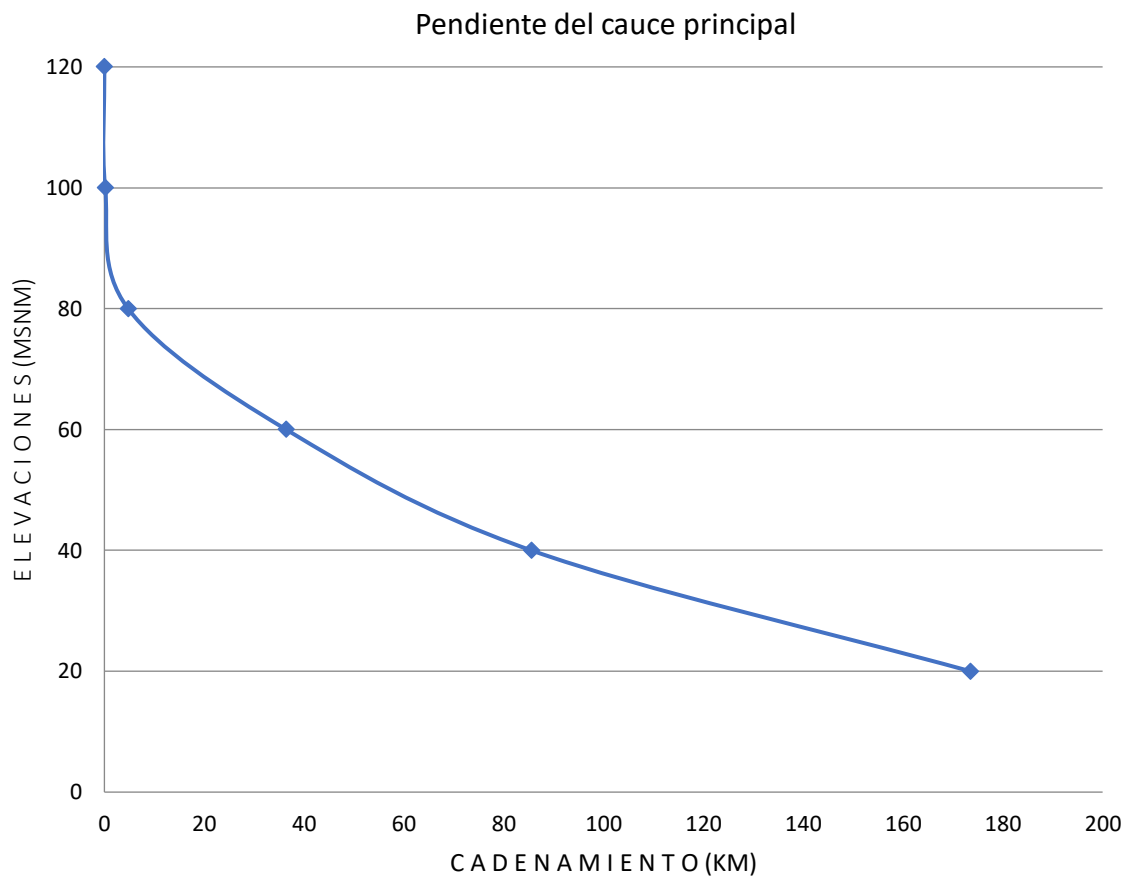


Figura 26. Perfil del cauce principal del río Sinú.

### 3.5. Parámetros hidrológicos de la cuenca

Los parámetros hidrológicos de una cuenca son estimaciones que involucran propiedades físicas de ésta, y que tienen una aplicación sobre las estimaciones hidrológicas. Algunos parámetros son el número de escurrimiento N, que caracteriza numéricamente los procesos hidrológicos suelo – cobertura en la estimación del escurrimiento directo, y el tiempo de concentración que corresponde a la respuesta de la cuenca a la lluvia. Estos parámetros se emplean para realizar comparaciones

entre cuencas y establecer relaciones hidrológicas, e intervienen en la mayoría de los cálculos hidrológicos, siendo un factor de escala de las estimaciones.

### **3.5.1. Numero de escurrimiento**

Uno de los métodos para calcular el coeficiente de escurrimiento fue desarrollado por los hidrólogos del *U.S. Soil Conservation Service* (Servicio de Conservación del Suelo de los Estados Unidos), y es conocido como el N o número de escurrimiento (valor relativo de escurrimiento directo que produce cada complejo hidrológico). Entre mayor sea el N, mayor será el volumen de escurrimiento de una tormenta en la cuenca. Por comodidad, los números de curva se tabulan en un rango de 0 a 100; para condiciones combinadas o especiales de la cuenca, el número de escurrimiento puede ser estimado por interpolación (Chow *et al.*, 1994).

Para determinar este parámetro, se definen los grupos hidrológicos de los suelos, que considera el potencial de los suelos para absorber humedad, y generar precipitación en exceso. Los grupos hidrológicos del suelo del SCS, son los siguientes (Campos-Aranda, 1998):

- Grupo A: Suelos con bajo potencial de escurrimiento, presentan altas velocidades de infiltración, consisten en arenas y gravas profundas, con drenaje bueno a excesivo.
- Grupo B: Son suelos con moderadas velocidades de infiltración cuando están mojados, presentan moderadas cantidades de texturas finas a gruesas, con drenaje medio y algo profundo.
- Grupo C: Son suelos con bajas velocidades de infiltración cuando están mojados, presentan estratos que impide el flujo del agua, suelos con texturas finas.
- Grupo D: Son suelos con alto potencial de escurrimiento, bajas velocidades de infiltración cuando están mojados, contienen suelos arcillosos, alto nivel freático y permanente.



El uso de suelo o cobertura del terreno se obtuvo a partir de información cartográfica básica, escala 1:100,000 del portal del Instituto Geográfico Agustín Codazzi, referente a la cobertura del suelo sobre la cuenca del río Sinú.

Para determinar los valores de número N para cada cobertura de suelo, asociada a un grupo de suelo hidrológico, se utiliza la Tabla. Número N de la curva de escurrimiento para los complejos hidrológicos suelo cobertura (Campos-Aranda, 2007).

Analizando la información correspondiente a la cobertura de suelo y la edafología, para determinar los grupos de suelo sobre la cuenca del río Sinú, se calcula el valor ponderado para el número N de la curva de escurrimiento en condiciones naturales medias de humedad, obteniendo un valor medio de **N= 77.35**, utilizando como base la Tabla 8 para la ponderación el número de escurrimiento:

Tabla 8. Ponderación del número de escurrimiento N. Continuación.

Número de escurrimiento sobre la cuenca del río Sinú							
	Clasificación del Suelo	Uso del Suelo	Tipo Suelo	N	Área (m <sup>2</sup> )	% de Superficie	N Ponderado
Río Sinú	Fluvisoles	Agro silvícola con cultivos permanentes	A	67	3665005.38	0.00	0.06
		Agro silvícola con cultivos transitorios	A	62	123982983.28	0.03	1.92
		Agrosilvopastoril con cultivos permanentes	A	67	36460240.20	0.01	0.61
		Cuerpo de agua	A	100	37068620.70	0.01	0.92
		Cultivos permanentes intensivos de clima cálido	A	67	33751613.66	0.01	0.56

Tabla 8. Ponderación del número de escurrimiento N. Continuación.

Número de escurrimiento sobre la cuenca del río Sinú								
Río Sinú	Clasificación de Suelo	Uso del Suelo	Tipo Suelo	N	Área (m <sup>2</sup> )	% de Superficie	N Ponderado	
	Fluvisoles	Cultivos permanentes intensivos de clima cálido	A	67	83499904	0.02	1.39	
		Conservación de Recursos Hídricos	A	36	130061873	0.03	1.17	
		Cultivos transitorios intensivos de clima cálido	A	58	87156885	0.02	1.26	
		Cultivos transitorios semi intensivos de clima cálido	A	58	207609487	0.05	3.00	
		Protección de producción	A	36	93267234	0.02	0.84	
		Pastoreo extensivo de clima cálido	A	49	1209537	0.00	0.01	
		Pastoreo semi intensivo de clima cálido	A	49	36256289	0.01	0.44	
		Zonas urbanas	A	74	19604023	0.00	0.36	
		Acrisoles	Agro silvícola con cultivos permanentes	D	89	372303986	0.09	8.26
			Agro silvícola con cultivos transitorios	D	81	188203296	0.05	3.80
	Agrosilvopastoril con cultivos permanentes		D	80	80315901	0.02	1.60	
	Agrosilvopastoril con cultivos transitorios		D	79	7397600	0.00	0.15	
	Cuerpo de agua		D	100	4349482	0.00	0.11	
	Cultivos permanentes intensivos de clima cálido		D	89	69672297	0.02	1.55	
	Cultivos permanentes semi intensivos de clima cálido		D	81	242582151	0.06	4.90	

Tabla 8. Ponderación del número de escurrimiento N. Continuación.

Número de escurrimiento sobre la cuenca del río Sinú							
Río Sinú	Clasificación del Suelo	Uso del Suelo	Tipo Suelo	N	Área (m <sup>2</sup> )	% de Superficie	N Ponderado
		Conservación de Recursos Hídricos	D	77	26821106	0.01	0.51
		Cultivos transitorios intensivos de clima cálido	D	85	140013992	0.03	2.97
		Cultivos transitorios semi intensivos de clima cálido	D	85	340799200	0.08	7.22
	Acrisoles	Forestal de producción de clima cálido	D	77	71440119	0.02	1.37
		Protección de producción	D	79	660393628	0.16	13.01
		Forestal de protección	D	77	30897879	0.01	0.59
		Pastoreo extensivo de clima cálido	D	84	4683359	0.00	0.10
		Pastoreo semi intensivo de clima cálido	D	84	3297875	0.00	0.07
		Zonas urbanas	D	92	4060343	0.00	0.09
	Luvisoles	Agro silvícola con cultivos permanentes	D	89	11444752	0.00	0.25
		Agro silvícola con cultivos transitorios	D	81	19607823	0.00	0.40
		Agrosilvopastoril con cultivos permanentes	D	89	14785812	0.00	0.33
		Cuerpo de agua	D	100	35508836	0.01	0.89
		Cultivos permanentes intensivos de clima cálido	D	85	73254345	0.02	1.55
		Cultivos permanentes semi intensivos de clima cálido	D	85	81271918	0.02	1.72
		Conservación de Recursos Hídricos	D	77	18919033	0.00	0.36

Tabla 8. Ponderación del número de escurrimiento N. Continuación.

Número de escurrimiento sobre la cuenca del río Sinú							
Río Sinú	Clasificación del Suelo	Uso del Suelo	Tipo de Suelo	N	Área (m <sup>2</sup> )	% de Superficie	N Ponderado
	Luvisoles	Cultivos transitorios intensivos de clima cálido	D	85	81428256	0.02	1.73
		Cultivos transitorios semi intensivos de clima cálido	D	85	45053373 2	0.11	9.55
		Protección de producción	D	79	10485443	0.00	0.21
		Forestal de protección	D	77	8379257	0.00	0.16
		Pastoreo extensivo de clima cálido	D	84	42878444	0.01	0.90
		Pastoreo semi intensivo de clima cálido	D	84	20874082	0.01	0.44
		Zonas urbanas	D	92	1401704	0.00	0.03
		<b>TOTAL</b>			<b>4011599362.7</b>		<b>1</b>

### 3.5.2. Tiempo de concentración

El tiempo de concentración ( $t_c$ ) se define como el tiempo que tarda el escurrimiento de la tormenta, en viajar desde el punto hidráulicamente más distante hasta la salida de la cuenca o punto de interés, o bien, un lapso transcurrido desde el final de la tormenta hasta el término de su hidrograma de escurrimiento superficial (Campos-Aranda, 2007). Los datos de entrada para los métodos de cálculo describen valores asociados a la cuenca como la longitud del cauce principal (L), pendiente media del cauce (S) y el desnivel del cauce principal (D).

Para el presente proyecto, el tiempo de concentración de la cuenca se calcula con los métodos de Rowe, Kirpich, SCS, Temez y Chow, adaptándose el valor del tiempo de concentración promedio de los valores obtenidos, presentando un tiempo de concentración de 67.4 horas mediante el método de Chow (Tabla 9).

Tabla 9. Métodos de cálculo para determinar el tiempo de concentración.

Método	Cálculo	Tc
Rowe	$tc = \left(\frac{0.87L^3}{D}\right)^{0.385}$	62.1 hr
Kirpich	$tc = 0.0003245 \left(\frac{L}{S^{1/2}}\right)^{0.77}$	77.2 hr
USSCS	$tc = \frac{L^{1.15}}{3085D^{0.38}}$	59.7 hr
Chow	$tc = 0.01 \left(\frac{L}{\sqrt{S}}\right)^{0.64}$	67.4 hr
Temez	$tc = 0.3 * \left(\frac{L}{S^{0.25}}\right)^{0.76}$	69.4
Tc Seleccionado:		<b>67.4 hr</b>

### 3.6. Estimación de la precipitación sobre la cuenca

#### 3.6.1. Precipitaciones máximas en 24 horas

Para el análisis de precipitaciones sobre la cuenca del río Sinú, se seleccionaron 15 estaciones pluviométricas, que estuvieran dentro y cerca de la cuenca, que tuvieran información suficiente y confiable para su análisis, para lo cual, se extrajo información de la precipitación máxima en 24 horas multianual desde 1970 hasta el 2019, descartando las estaciones pluviométricas que tuvieran menos de 20 años para generar un registro confiable de precipitaciones (Tabla 10).

Tabla 10. Estaciones pluviométricas utilizadas para el análisis hidrológico.

ID	ESTACIÓN PLUVIOMÉTRICA	ALTITUD	LATITUD	LONGITUD
1	TIERRALTA [13030010]	100	8.18667	-76.05306
2	BUENOS AIRES [13060020]	55	8.47583	-75.76528
3	MARACAYO [13065020]	25	8.41056	-75.88444
4	CENTRO ALEGRE [25015010]	170	8.18078	-75.63228
5	TAMPA [13070290]	20	8.62472	-75.76722
6	UNIV DE CORDOBA [13075050]	15	8.79389	-75.86153
7	LOMA VERDE [13050030]	100	8.50194	-76.17528
8	PUEBLO BELLO [12020010]	10	8.20000	-76.52
9	SAN FRANCISCO [25010100]	160	8.12917	-75.76
10	CARAMELO [13060030]	60	8.26611	-75.90389
11	PICA PICA [25010080]	100	8.03111	-75.68306
12	PEZVAL [13040030]	80	8.26222	-76.16917
13	SAN ANTERITO [13060010]	75	8.55778	-75.86111
14	PLANETA RICA - AUT [25025190]	90	8.39933	-75.58372
15	SANTA CRUZ HACIENDA [13050020]	220	8.6675	-76.12389

La precipitación máxima en 24 horas asociadas a cada estación pluviométrica desde 1970 hasta 2020, puede visualizarse en la siguiente Tabla 11 y Tabla 12, donde el ID representa la información de cada estación pluviométrica.

Tabla 11. Precipitación máxima en 24 horas multianual por estación pluviométrica (1/2)

AÑO	ID	1	2	3	4	5	6	7	8
1970		132.0	91.0					80.0	
1971		75.0	70.0					70.0	
1972		106.0	94.0					56.0	60.0
1973		93.0	71.0					72.0	85.0
1974		92.0	78.0		70.0			55.0	62.0
1975		125.0	70.0		20.0			70.0	70.0
1976		137.0	92.0					116.0	131.0
1977		80.0	77.0					49.0	73.0
1978		99.0	66.0		97.0	118.0		70.0	98.0
1979		106.0	92.0	94.5	104.0	61.0	39.0	126.0	104.0
1980		72.0	138.0	135.3	70.0	92.0	78.6	115.0	75.0
1981		95.0	95.0	83.0	72.0	71.0	100.0	64.0	102.0
1982		61.0	61.0	80.0	90.3	51.0	57.3	98.0	80.0
1983		144.0	70.0	82.0	79.0	56.0	96.2	66.0	85.0
1984		75.0	106.0	102.0	88.0	105.0	69.0	77.0	75.0
1985		146.0	110.0	91.0	100.1	86.0	71.4	96.0	80.0
1986		116.0	97.0	96.0	81.0	170.0	73.0	63.0	75.0
1987		104.0	65.0	90.0	95.0	102.0	82.0	73.0	105.0
1988		77.0	112.0	111.0	100.0	84.0	102.8	95.0	65.0
1989		95.0	115.0	68.0	90.5	72.0	83.0	87.0	109.0
1990		66.0	102.0	137.0	91.0	110.0	142.6	80.0	105.0
1991		130.0	67.0	110.0	98.0	70.0	60.0	80.0	74.0
1992		38.0	68.7	66.0	115.0	95.0	68.2	100.0	73.0
1993		81.0	75.0	87.0	106.3	110.0	83.8	90.0	80.0
1994		130.0	62.0	76.0	65.0	72.0	76.0	60.0	70.0
1995		65.0	115.0	0.0	67.0	84.0	64.0	74.0	135.0
1996		130.0	129.0	87.0	108.0	80.0	84.0	80.0	135.0
1997		150.0	103.0	76.0	131.0	112.0	182.0	90.0	132.0
1998		119.0	90.0	90.0	90.0	90.0	79.0	85.0	132.0
1999		87.0	35.0	83.0	48.0	42.0	61.0	67.0	90.0
2000		110.0	107.0		85.0	150.0	80.0	57.0	115.0
2001		119.0	70.0		90.0	120.0	71.0	76.0	104.0
2002		94.0	69.0	65.0	112.0	80.0	51.0	83.0	80.0
2003		115.0	80.0	90.0	105.0	87.0	145.0	115.0	145.0
2004		134.0	93.0	76.0	89.0	100.0	54.0	94.0	67.0
2005		104.0	125.0	130.0	99.0	100.0	93.5	95.0	138.0
2006		115.0	100.0	70.0	82.0	90.0	101.2	85.0	144.0
2007		92.0	112.0	135.0	146.0	80.0	85.0	124.0	105.0
2008		75.0	100.0	90.0	116.0	90.0	88.0	58.0	148.0
2009		90.0	100.0	110.0	126.0	56.0	83.5	41.0	45.0
2010		135.0	92.0	81.0	85.0			72.0	109.0
2011		107.0	102.0	76.0	138.0	96.0	83.0	50.0	197.0
2012		80.0	75.0	100.0	129.0	101.0	110.0	77.0	127.0
2013		115.0	75.0	80.0	81.0	48.0	56.5	69.0	84.0
2014		77.0	51.0	77.0	76.0	125.0		70.0	116.0
2015		95.0	60.0	106.0	78.0		50.9	90.0	56.0
2016		101.0	126.0	97.0	99.4			90.0	70.0
2017		121.4	120.0	82.0	65.5			97.0	177.0
2018		142.0	150.0	90.0	38.0			69.0	75.0
2019		87.8	92.0	28.0	125.0			10.0	84.0
2020		134.0							94.0

Tabla 12. Precipitación máxima en 24 horas multianual por estación pluviométrica (2/2)

<b>AÑO</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>
1970		99.0					
1971		140.0					
1972		87.0					
1973		140.0	12.0		30.0		32.0
1974		83.0	60.0		45.0		86.0
1975		80.0	133.0		95.0		44.0
1976	70.0	102.0	93.0		88.0	95.0	107.0
1977	127.0	71.0	170.0		120.0	88.5	69.0
1978	125.0	83.0	120.0		105.0	124.0	120.0
1979	78.0	60.0	120.0		81.0	93.0	65.0
1980	170.0	132.0	100.0		85.0	159.6	97.0
1981	97.0	72.0	105.0		80.0	75.0	69.0
1982	107.0	124.0	10.0		82.0	136.0	72.0
1983	158.0	85.0	100.0		90.0	100.8	110.0
1984	80.0	138.0	88.0		90.0	69.0	64.9
1985	128.0	87.0	110.0		52.0	56.0	95.0
1986	99.0	78.0	85.0		90.0	140.0	80.7
1987	77.0	70.0	110.0		74.0	70.4	107.0
1988	107.0	100.0	95.0		150.0	50.4	63.0
1989	81.0	114.0	74.0		109.0	160.0	78.0
1990	100.0	55.0	130.0	60.0	102.0	151.7	55.0
1991	101.0	90.0	140.0	30.0	67.0	130.0	99.2
1992	65.0	67.0	110.0	81.0	60.0	93.1	148.0
1993	106.0	123.0	130.0	82.0	65.0	130.5	70.0
1994	82.0	92.4	110.0	78.0	60.0	71.0	78.0
1995	133.0	64.4	105.0	9.0	80.0	83.0	62.0
1996	91.0	118.8	110.0	130.0	102.0	89.0	86.0
1997	93.0	79.4	140.0	90.0	85.0	97.0	88.0
1998	150.0	110.0	95.0	80.0	70.0	87.7	86.0
1999	100.0	100.9	56.0	127.5	50.0	77.5	89.0
2000	82.0	80.5	82.0	90.0	85.0	65.0	70.0
2001	109.0	70.8	81.0	121.0	99.0	93.5	84.0
2002	121.0	90.0	93.0	95.0	98.0	81.0	73.0
2003	100.0	108.5	88.0	73.0	91.0	70.0	65.0
2004	99.0	127.9	130.0	106.0	117.0	80.5	38.0
2005	110.0	100.0	90.0	102.0	138.0	83.0	75.0
2006	102.0	70.7	75.0	102.0	65.0	83.0	68.0
2007	84.0	115.1	105.0	103.6	81.0	127.0	75.0
2008	84.0	89.6	116.0	114.9	140.0	111.0	57.0
2009	91.0	78.5	75.0	77.4	90.0	92.0	45.0
2010	96.0	85.0	99.0	87.7	79.0	105.0	79.0
2011	102.0	100.5	115.0	82.9	102.0	110.0	67.0
2012	110.0	130.7	124.0	79.8	120.0	97.0	72.0
2013	110.0	135.0	49.0	103.0	87.0	89.0	62.0
2014	46.0	60.0	65.0	55.9	112.0	105.0	65.0
2015	115.0	82.0	78.0	64.2	56.0	65.0	60.0
2016	145.0	76.0	48.0	107.2	87.0	59.0	39.0
2017	96.0	170.0	90.0	81.3	86.0	82.7	73.0
2018	150.0	140.0	119.0	78.0	125.0	79.5	61.0
2019	98.0	85.6	97.0	107.0	67.0	103.4	40.0
2020		52.0		39.0	57.0	16.7	

### 3.6.2. Estimación de datos faltantes

Los datos o valores faltantes de un registro de lluvias, son bastantes frecuentes y se deben a una gran variedad de causas. Algunas de ellas, debido a desperfectos en el equipo de mediciones, por enfermedad o sustitución del encargado de las observaciones, por interrupciones debidas a limitaciones presupuestales, entre otras. En general, los datos faltantes son estimados en base a los registros de las estaciones cercanas o en base al propio registro de la estación (Campos-Aranda, 1998).

Para el presente proyecto, se utiliza el método del *U.S. National Weather Service*, que corresponde a un procedimiento verificado teórica y empíricamente, considera que el dato faltante en cierta estación A, puede ser estimado en base a los datos observados en las estaciones circundantes. Este método puede ser aplicado a valores diarios, mensuales o anuales faltantes (Campos-Aranda, 1998).

El método consiste en ponderar los valores observados en una cantidad (W), igual al recíproco del cuadrado de la distancia (D) entre cada estación vecina y la estación A. La lluvia buscada Px será igual a:

$$P_x = \frac{\sum(P_i W_i)}{\sum W_i}$$

Donde

Pi = precipitación observada para la fecha faltante, en las estaciones auxiliares circundantes, en milímetros.

Wi =  $1/D_i^2$ , siendo Di la distancia entre cada estación circundante y la estación incompleta, en kilómetros.

Se recomienda utilizar cuatro estaciones auxiliares (las más cercanas) y de manera que cada una quede localizada en uno de los cuadrantes que definen unos ejes coordenados que pasan por la estación incompleta, sin embargo, de no haber estaciones sobre los cuatro ejes coordenados, se utilizan al menos tres estaciones espacialmente distribuidas (Campos-Aranda, 1998).



Para el análisis del registro de las estaciones pluviométricas, sobre la zona de estudio, se completaron las precipitaciones máximas mensuales de cada estación pluviométrica, utilizando el método anterior para cada estación A, e identificando las respectivas estaciones de apoyo para completar los datos faltantes de cada estación. Se presentaron algunas situaciones, donde las estaciones de apoyo que no tenían registro, en el mes con datos faltantes para completar la estación A, procediendo a omitir el mes que no fue posible completar.

Una vez terminada la estimación de datos faltantes en los registros históricos de las 15 estaciones analizadas, se obtuvieron las precipitaciones máximas en 24 horas desde 1970 hasta 2020, utilizadas para el análisis hidrológico de la cuenca.

### **3.6.3. Serie anual de máximos**

Los datos de precipitación máxima diaria son generalmente presentados en un registro mensual, en el que se indica el valor máximo que ocurrió en cada mes de un año, y cada máximo de los doce valores anteriores, integran el registro anual. En el procesamiento estadístico de la información anterior, no se emplean todos los datos, sino que sólo se utilizan las magnitudes más grande so críticas, los cuales forman la serie estadística (Campos-Aranda, 2007).

Normalmente, se emplean dos tipos de series estadísticas, la anual y de duración parcial; la primera está integrada por los eventos máximos de cada año y la segunda por los valores que superan cierta magnitud.

La serie anua de máximos es la más utilizada por si rapidez y facilidad de integración, además, esta serie presenta una base teórica sólida para la extrapolación de los eventos, más allá del intervalo de observación, a través del concepto de período de retorno (Campos-Aranda, 2007).

Usando como base la información histórica registrada en cada estación pluviométrica, se obtuvo serie anual de máximos en 24 horas para la zona de estudio, considerando el registro máximo anual de todas las estaciones analizadas.

La Tabla 13 muestra los registros máximos anuales en 24 horas sobre la cuenca del río Sinú.

*Tabla 13. Precipitación máxima en 24 horas anuales desde 1970 a 2020.*

<b>AÑO</b>	<b>PRECIPITACIÓN MAX 24HR (mm)</b>	<b>AÑO</b>	<b>PRECIPITACIÓN MAX 24HR (mm)</b>
1970	132	1995	135
1971	140	1996	135
1972	106	1997	182
1973	140	1998	150
1974	92	1999	127.5
1975	133	2000	150
1976	137	2001	121
1977	170	2002	121
1978	125	2003	145
1979	126	2004	134
1980	170	2005	138
1981	105	2006	144
1982	136	2007	146
1983	158	2008	148
1984	138	2009	126
1985	146	2010	135
1986	170	2011	197
1987	110	2012	130.7
1988	150	2013	135
1989	160	2014	125
1990	151.7	2015	115
1991	140	2016	145
1992	148	2017	177
1993	130.5	2018	150
1994	130	2019	125
		2020	134

### **3.6.4. Distribuciones de probabilidad**

Entre las diversas funciones de distribución para el análisis de frecuencias de gastos máximos o de precipitaciones máximas en 24 horas, se usan las funciones de distribución: normal, Log normal dos parámetros, Log normal tres parámetros,

Gamma dos parámetros, Gamma tres parámetros, Exponencial uno, Exponencial dos parámetros, Gumbel y Gumbel doble y de valores extremos.

La estimación de parámetros de una función tiene como finalidad poder calcular los gastos o las precipitaciones de diseño, y para poder estimar los parámetros de una función de distribución necesitamos utilizar algún método que nos ayude a minimizar la suma de los errores estándar, para lo cual existen varios métodos para tal fin, como son el método de momentos, máxima verosimilitud, momentos de probabilidad pesada, mínimos cuadrados, método de momentos, principio de máxima entropía y sextiles.

Para este estudio utilizamos únicamente los métodos de momentos y de máxima verosimilitud, ya que son los más utilizados para el análisis de frecuencias. Para el caso del método de momentos, la estimación de los parámetros desconocidos se logra al igualar los momentos correspondientes de la población y de la muestra, obteniendo así “n” ecuaciones con “n” incógnitas que son los parámetros buscados.

Este método a pesar de ser de fácil aplicación es un método que requiere del cálculo de integrales que contienen a la función de densidad  $f(x)$ , las cuales no siempre se resuelven fácilmente.

En este caso tenemos disponibles los registros de datos climatológicos de las precipitaciones máximas anuales que, a través de su conocimiento del problema físico, permite determinar un modelo probabilístico, que represente en forma satisfactoria el comportamiento de la variable.

Si el ajuste de la función a los datos es bueno, se puede utilizar la distribución una vez encontrada la ley de distribución que sigue a las variables aleatorias, además se podrá predecir con determinada probabilidad, la ocurrencia de una determinada magnitud, de un fenómeno hidrometeorológico o bien la magnitud de un fenómeno para un determinado periodo de retorno.

El análisis probabilístico de las precipitaciones máximas anuales se realiza, a través del procesamiento estadístico, ajustándose a diversas funciones de distribución de probabilidades, que se señalan a continuación y para diferentes periodos de retorno,

como la distribución normal, exponencial 1 parámetro, exponencial 2 parámetros, log normal 2 parámetros, log normal 3 parámetros, gamma 2 parámetros, gamma 3 parámetros, log Pearson tipo III, general de valores extremos, gumbel y gumbel doble.

Para el análisis de frecuencias de las precipitaciones se utilizó el programa AFA, desarrollado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), donde los valores obtenidos mediante la función de ajuste seleccionada representan las lluvias de diseño asociadas a un periodo de retorno. Tomando los datos de las lluvias máximas anuales en 24 horas obtenidas de las estaciones, se obtuvieron las precipitaciones para cada periodo de retorno.

Se realiza el análisis a cada estación pluviométrica, la función de distribución que resulte con el menor error estándar, permite identificar las precipitaciones de diseño que se adaptaron a los valores obtenidos a estas distribuciones, ya que se considera que tiene un mejor ajuste al comportamiento de las precipitaciones.

Los valores obtenidos mediante las funciones de ajuste seleccionadas representan las lluvias de diseño asociada a un determinado periodo de retorno, pero debido a que se aplicó el criterio de polígonos de Thiessen para determinar el área de influencia de cada una de las estaciones pluviométricas (Tabla 14), es necesario ponderar las extrapolaciones obtenidas en función de su área de influencia.

Tabla 14. Ponderación de extrapolación de lluvias máximas anuales.

CUENCA RÍO SINÚ																
ESTACIÓN	PICA PICA	LOMA VERDE	BUENOS AIRES	SAN FRANCISCO	PEZVAL	PUEBLO BELLO	SANTA CRUZ	TIERRALTA	TAMPA	SAN ANTERITO	CARAMELO	UNIV DE CORDOBA	MARACAYO	PLANETA RICA	CENTRO ALEGRE	ÁREA TOTAL
Área de Influencia (km <sup>2</sup> )	1.193	182.122	337.643	263.090	788.104	9.391	47.032	784.813	47.138	391.291	458.722	102.648	427.297	70.313	100.802	4011.60
Influencia (%)	0.03%	4.54%	8.42%	6.56%	19.65%	0.23%	1.17%	19.56%	1.18%	9.75%	11.43%	2.56%	10.65%	1.75%	2.51%	100%
PONDERACION DE EXTRAPOLACION DE LLUVIAS MAXIMAS EN 24 HORAS																
Tr	Hp (mm)	Hp (mm)	Hp (mm)	Hp (mm)	Hp (mm)	Hp (mm)	Hp (mm)	Hp (mm)	Hp (mm)	Hp (mm)	Hp (mm)	Hp (mm)	Hp (mm)	Hp (mm)	Hp (mm)	Hp (mm)
1	63.21	44.99	51.71	57.57	56.23	46.26	50.34	62.84	51.41	49.89	55.59	48.69	60.48	53.37	59.55	<b>56.17</b>
2	100.49	77.64	88.75	101.01	90.55	93.99	74.44	102.44	88.44	86.52	92.14	80.29	87.94	90.62	92.39	<b>91.92</b>
3	110.33	85.95	97.85	112.59	95.85	107.96	82.90	109.35	98.91	96.88	103.81	91.42	96.74	103.96	102.18	<b>100.52</b>
4	116.98	91.74	104.37	120.35	101.44	116.67	88.06	115.91	105.61	103.52	111.26	97.45	101.86	111.10	107.70	<b>106.84</b>
5	120.89	95.22	109.12	124.01	108.13	123.39	92.03	124.15	110.57	108.42	116.72	101.40	105.74	122.40	111.74	<b>112.61</b>
10	133.58	105.95	121.57	138.06	117.33	143.07	104.09	135.55	125.23	122.92	132.59	132.36	117.62	138.44	124.15	<b>125.34</b>
25	148.95	118.72	136.42	154.79	127.14	162.13	119.36	147.26	143.75	141.25	151.99	158.39	132.47	151.29	139.27	<b>139.79</b>
50	160.01	127.78	146.96	166.66	133.47	187.23	130.66	154.35	157.49	154.84	165.97	169.79	143.32	160.04	150.13	<b>149.66</b>
100	170.81	136.51	157.13	178.10	139.16	206.48	141.84	160.29	171.12	168.33	179.57	180.08	153.99	168.66	160.68	<b>158.96</b>
200	181.47	145.03	167.06	189.27	144.38	226.12	152.96	165.27	184.71	181.77	192.89	189.95	164.53	177.37	170.99	<b>167.88</b>
500	195.47	156.06	179.93	203.74	150.69	252.88	167.61	170.68	202.64	199.51	210.20	202.70	178.34	189.22	184.37	<b>179.21</b>
Influencia (%)	0.03%	4.54%	8.42%	6.56%	19.65%	0.23%	1.17%	19.56%	1.18%	9.75%	11.43%	2.56%	10.65%	1.75%	2.51%	
Funcion Distribucion	Gumbel Doble	Gumbel Doble	Gumbel Doble	Gumbel Doble	Log Pearson Tipo III	Gumbel Doble	Log Normal 3 Parametros	Gumbel Doble	Gumbel Doble	Gumbel Doble	Distribución Gamma 3 Parametros	Gumbel Doble	Gumbel Doble	Gumbel Doble	Log Pearson Tipo III	
Mínimo Error Estandar	8	9.6	4.8	6.5	10.5	15.2	13.3	12.1	8.2	6.7	9.2	4.8	7.4	12.1	22.3	

### 3.6.5. Lluvia de diseño en la cuenca

Para obtener la lluvia de diseño (Hpd), se utilizó la fórmula de Emil Kuishiling y C.E. Gransky, quienes consideran que la duración de la tormenta es igual al tiempo de concentración. Este método sugiere las siguientes expresiones (Chow *et al.*, 1994):

$$Hpd = \frac{KTC^{1-e}}{(1-e)} \quad \text{Dónde: } K = \frac{Hp(1-e)}{24^{1-e}}$$

Para apegar la distribución de la tormenta a la forma de la curva de máxima intensidad del método sugiere emplear un factor (e), el cual depende del tiempo de concentración y su valor oscila entre 0.45 y 0.80, para este caso su valor será de 0.45 por encontrarse en un rango superior a 48h de tiempo de concentración. La Tabla 15 muestra las consideraciones tomadas para elegir el valor (e) en función del tiempo de concentración.

Tabla 15. Valores recomendados para el parámetro (e) en la ecuación de Kuischling.

Rango de e	Descripción de la cuenca
0.45 a 0.50	Muy grandes con Tc >= 48h
0.50 a 0.55	Grandes con 24 h < Tc < 48 h
0.55 a 0.60	Medianas con 6 h < Tc <= 24 h
0.60 a 0.70	Chicas con 1 h < Tc < 6 h
0.70 a 0.80	Muy pequeñas con Tc < 1 h

Debido a la variación del tiempo de concentración para cada microcuenca, se tiene diferente lluvia de diseño, por ello, se presentan las diferentes lluvias de diseño calculadas (Tabla 16).

Tabla 16. Lluvia de diseño en la cuenca del río Sinú.

Tr	Precipitación máx (mm)	K	Hpd (mm)
1	56.175	5.380	99.127
2	91.918	8.803	162.200
3	100.519	9.627	177.376
4	106.843	10.233	188.537
5	112.606	10.785	198.706
10	125.343	12.005	221.182
25	139.792	13.388	246.678
50	149.655	14.333	264.084
100	158.965	15.225	280.511
200	167.879	16.078	296.241
500	179.210	17.164	316.236

### 3.6.6. Lluvia en exceso

La precipitación que resulta de restar la precipitación total, producida por las pérdidas, se le conoce como lluvia en exceso o efectiva y es la que da origen al escurrimiento directo. Para obtener la lluvia en exceso se emplea el método del Servicio de Conservación de Suelos de EUA (SCS), donde se aplica la siguiente ecuación (Breña & Jacobo, 2006):

$$He = \frac{10(Hpd/10 - (508/N) + 5.08)^2}{(Hpd/10 + (2032/N) - 20.32)}$$

Donde

He= lluvia en exceso

Hpd= precipitación de diseño sobre la cuenca

N= número de escurrimiento

En la Tabla 17, se muestran los valores correspondientes a la lluvia en exceso estimada para cada periodo de retorno, considerando el número de escurrimiento estimado anteriormente, igual a N= 77.35

Tabla 17. Lluvia en exceso (He) en la cuenca para diferentes periodos de retorno.

Tr	He (mm)
1	36.63
2	86.04
3	98.95
4	108.61
5	117.51
10	137.50
25	160.59
50	176.56
100	191.77
200	206.42
500	225.18

### 3.6.7. Curvas I-D-TR

La precipitación de diseño se puede construir mediante las curvas I-D-TR, para lo cual, se comienza por calcular las intensidades con duración de 60 minutos y periodos de retorno (Tr) de 10, 25 y 50 años, utilizando la fórmula de Bell y se designarán por:  $P_1^{10}$ ,  $P_1^{25}$ ,  $P_1^{50}$  respectivamente. Estas intensidades tener duración de una hora corresponden a precipitaciones o lámina de lluvia en milímetros. En seguida, las predicciones de lluvia máxima de periodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años se multiplican por 1.13 para convertirlas en  $P_{24}^{Tr}$ , con los cuales se obtienen los cocientes lluvia-duración (R) y lluvia frecuencia (F) necesarios para aplicar la fórmula de Chen (Chow *et al.*, 1994), estos son:

$$R = \frac{P_1^{Tr}}{P_{24}^{Tr}}$$

$$F = \frac{P_{24}^{100}}{P_{24}^{10}}$$

Con el valor promedio ( $R_{prom}$ ) de los tres cocientes R que se pueden evaluar, uno para cada periodo de retorno de 10, 25 y 50 años, se obtienen las gráficas propuestas por Chen los parámetros a, b y c de la formula expuesta. Estas gráficas se han expresado en forma de ecuación de regresión polinomial.

$$a = -2.297536 + 100.0389R - 432.5438R^2 + 1256.228R^3 - 1028.902R^4$$

$$b = -9.845761 + 96.94864R - 341.4349R^2 + 757.9172R^3 - 598.7461R^4$$

$$c = -0.06498345 + 5.069294R - 16.08111R^2 + 29.09596R^3 - 20.06288R^4$$

Las expresiones anteriores fueron calculadas con base en las seis parejas de valores R-a, R-b y R-c que presenta Chen, sus coeficientes de determinación son prácticamente de 100% y son válidas únicamente en el intervalo  $0.10 \leq R \leq 0.60$ . La fórmula de Cheng es la siguiente:

$$i_t^{Tr} = \frac{aP_1^{10} \log(10^{2-F} Tr^{F-1})}{(t+b)^c} = \frac{\alpha_{Tr}}{(t+b)^c}$$

$i_t^{Tr}$  está mm/h,  $P_1^{10}$  en mm,  $t$  en minutos ( $5 \leq t \leq 1,440$ ). Los valores calculados de  $i_t^{Tr}$  permiten dibujar las curvas I-D-Tr buscadas. Aplicando el método detallado anteriormente, se empieza por multiplicar las predicciones de lluvia diaria para diferentes periodos de retorno por 1.13 para convertirlas en precipitaciones de 24 horas de duración e igual Tr ( $P_{24}^{Tr}$ ). En la Tabla 18 se muestran los resultados.

Tabla 18. Precipitaciones convertidas a 24 horas.

Tr (años)	Lluvia Max (mm)	$P_{24}^{Tr}$ (mm)
2	91.9	103.9
5	112.6	127.2
10	125.3	141.6
25	139.8	158.0
50	149.7	169.1
100	159.0	179.6
200	167.9	189.7
500	179.2	202.5

Este método necesita el valor de la intensidad de la lluvia para 60 minutos (1 hora) para los periodos de retorno de 10, 25 y 50 años.

La Organización Meteorológica Mundial, indica que el cociente entre la lluvia en una hora de período de retorno de 2 años y la de 24 horas e igual frecuencia, se ha relacionado con la ocurrencia de tormentas, mediante estudios que incluyeron un amplio rango de climas del mundo, las relaciones encontradas se observan en la Tabla 19.

Tabla 19. Cociente entre la lluvia de 1 hora y la de 24 horas.

Número medio de días con lluvia por año*	1	8	16	24 o mayor
(P1 hora / P24 horas)2 años	0.2	0.3	0.4	0.5

De acuerdo con el registro de las estaciones pluviométricas analizadas, el número de días por años registrados, mayor a 1 mm, es mayor a 24 días, por lo que, según la Tabla 19, se toma el cociente de 0.50.

El valor de la precipitación con intensidad de una hora y periodo de retorno de 2 años es de:



$$P_{1\text{ hora}}^{2\text{ años}} = (0.5)(103.9\text{mm}) = 51.9\text{ mm}$$

Para conocer el valor de la precipitación con intensidad de 1 hora para los periodos de retorno faltantes, se utilizará la fórmula de Bell.

$$P_{60\text{ min}}^{Tr} = [0.35 \ln(Tr) + 0.76][0.54(t)^{0.25} - 0.5]P_{1\text{ hora}}^{2\text{ años}}$$

Sustituyendo el valor de la intensidad de  $t = 60$  minutos y el valor de la precipitación para una intensidad de 1 hora y 2 años de periodo de retorno, se tiene la siguiente ecuación (Chow *et al.*, 1994).

$$P_{60\text{ min}}^{Tr} = [0.35 \ln(Tr) + 0.76][0.54(60)^{0.25} - 0.5]51.9$$

Los valores obtenidos aplicando la fórmula de Bell se muestran en la Tabla 20.

Tabla 20. Valores de intensidad de la lluvia para 60 minutos

Tr (años)	$P_{60\text{ min}}^{Tr}$ (mm)
2	51.9
5	68.9
10	81.6
25	98.3
50	110.9
100	123.5
200	136.2
500	152.9

Utilizando los valores mostrados en la tabla anterior, se obtienen los valores de R y de F, cuyos valores se muestran en la Tabla 21.

Tabla 21. Valores de los parámetros R y F para la cuenca

Tr (años)	R	F
2	0.50	1.268
5	0.54	1.268
10	0.58	1.268
25	0.62	1.268
50	0.66	1.268
100	0.69	1.268
200	0.72	1.268
500	0.75	1.268

Se utiliza un valor promedio de  $R= 0.69$  y un valor de  $F= 1.268$

Los valores de las variables a, b, c se muestran en la tabla 22, teniendo en consideración que para la cuenca en estudio el valor de R promedio es mayor que 0.10 y menor a 0.6.

Tabla 22. Variables a, b, c del método de Cheng

Variables a, b, c del método de Cheng	
a	48.231
b	12.360
c	0.899

Aplicando el método de Cheng, se obtienen intensidades para diferentes duraciones y periodos de retorno, graficando la información para obtener las curvas I-D-TR.

Tabla 23. Valores obtenidos aplicando el método de Cheng

Tr (años)	Duración min (Intensidad)										
	5	10	15	20	30	45	60	80	100	120	48.65
2	245.6	195.6	163.2	140.3	110.2	83.9	68.1	54.7	45.8	39.6	79.4
5	277.9	221.3	184.6	158.8	124.6	94.9	77.0	61.8	51.8	44.7	89.8
10	302.3	240.8	200.8	172.7	135.6	103.2	83.8	67.3	56.4	48.7	97.7
25	334.6	266.5	222.3	191.1	150.0	114.3	92.7	74.5	62.4	53.9	108.1
50	359.0	285.9	238.5	205.1	161.0	122.6	99.5	79.9	67.0	57.8	116.0
100	383.4	305.4	254.7	219.0	171.9	130.9	106.2	85.3	71.5	61.7	123.9
200	407.8	324.8	270.9	233.0	182.9	139.3	113.0	90.7	76.1	65.7	131.7
500	440.1	350.5	292.4	251.4	197.4	150.3	122.0	97.9	82.1	70.9	142.2

Las curvas I-D-TR, que se muestra en la Figura 27, se formaron a partir de la información mostrada en la Tabla 23.

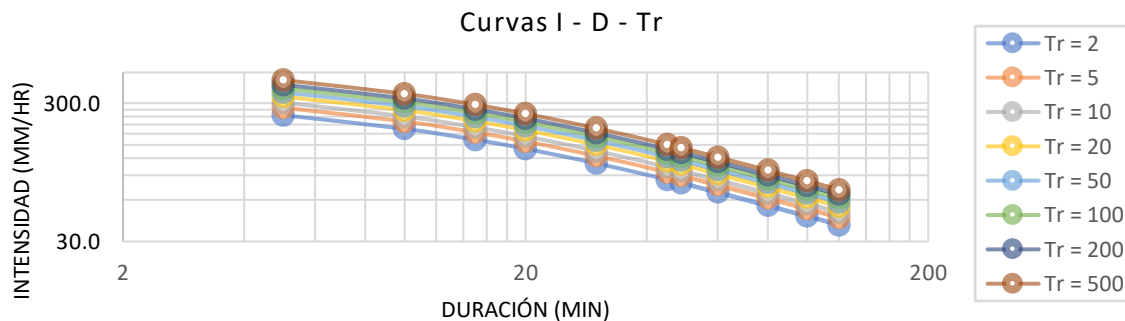


Figura 27. Curvas I-D-TR de la zona de estudio.

### 3.7. Métodos semiempíricos para estimar caudales

Para la estimación de caudales se emplean métodos semiempíricos que se usan cuando se dispone de información que caracterice la precipitación que, relacionada con las características fisiográficas de la cuenca en estudio, permite calcular la magnitud de los escurrimientos en el sitio donde sea de interés para los períodos de retorno que se establezcan.

Los métodos semiempíricos más comúnmente utilizados son el Hidrograma Unitario Triangular, el Método Racional, Método de Ven T Chow y el Método de Snyder.

En el presente proyecto, el cálculo de la avenida de diseño se realiza para diferentes periodos de retorno ( $t_r$ ) a través de métodos semiempíricos.

#### 3.7.1. Método racional

El método racional es utilizado para obtener caudales en cuencas urbanas pequeñas, establece que la intensidad ( $I$ ) de lluvia comienza instantáneamente y continua indefinidamente, la cantidad de escurrimiento se va incrementando hasta alcanzar el tiempo de concentración ( $t_c$ ), cuando toda la cuenca está contribuyendo al flujo en su salida. Por lo anterior, la intensidad tiene una duración igual al  $t_c$  y corresponde al periodo de retorno de la creciente o gasto máximo que se estima.

Este método se recomienda para cuencas de hasta 25 km<sup>2</sup>, aunque también se puede utilizar en cuencas de hasta 100 km<sup>2</sup>, considerando que el grado de confiabilidad disminuye al incrementarse el área (Chow *et al.*, 1994).

$$Q = 0.278 CIA$$

Para calcular la lluvia en exceso se aplicó el criterio del Servicio de Conservación de Suelos en EUA (SCS)

$$C_e = \frac{He}{Hpd} \quad I = \frac{K}{(1 - e)Tc^e}$$

Los caudales se estimaron aplicando el método racional, los resultados se muestran en la Tabla 24:

Tabla 24. Caudales máximos estimados por el método racional.

Tr	He (mm)	Ce	I (mm/hr)	Q Max (m <sup>3</sup> /s)
1	36.63	0.37	1.47	606.12
2	86.04	0.530	2.407	1423.71
3	98.95	0.56	2.63	1637.23
4	108.61	0.576	2.797	1797.00
5	117.51	0.591	2.948	1944.34
10	137.50	0.622	3.282	2275.06
25	160.59	0.651	3.660	2657.18
50	176.56	0.669	3.918	2921.45
100	191.77	0.684	4.162	3173.01
200	206.42	0.697	4.395	3415.55
500	225.18	0.712	4.692	3725.91

### 3.7.2. Método del Hidrograma Unitario Triangular

El hidrograma unitario se define como el hidrograma de gasto resultante de una lluvia en exceso unitaria ocurriendo uniformemente sobre la cuenca y durante la duración unitaria especificada. Este método es una simplificación propuesta por el *Soil Conservation Service* para la técnica de los hidrogramas unitarios sintéticos (Campos-Aranda, 2010).

El hidrograma unitario triangular se ha desarrollado para determinar parámetros fundamentales del hidrograma, como caudal pico (Qp), tiempo base (tb) y el tiempo en que se produce la punta (tp)

Las características del hidrograma unitarios se determinaron mediante las siguientes formulas:

$$Q = \frac{0.556HeA}{n \times Tp}$$

$$Tp = 0.60Tc + D/2 \quad n = 2 + \frac{area - 250}{1583.33}$$

Dónde:

$T_p$ = tiempo al pico;

$H_e$ = lluvia en exceso

$A$ = área de la cuenca

$T_c$ = tiempo de concentración;

$D$ = duración de la lluvia

$n$ = factor en función del área de la cuenca

La estimación de caudales aplicando el método del hidrograma unitario triangular se obtiene al aplicar las fórmulas anteriores, asociadas a diferentes periodos de retorno (Tabla 25).

Tabla 25. Caudales máximos estimados por el método del hidrograma unitario triangular.

Tr (años)	He (mm)	Q Max (m <sup>3</sup> /s)
1	36.632	383.81
2	86.045	901.53
3	98.949	1036.73
4	108.605	1137.91
5	117.510	1231.20
10	137.497	1440.62
25	160.592	1682.59
50	176.564	1849.93
100	191.767	2009.22
200	206.425	2162.80
500	225.182	2359.33

### 3.7.3. Método de Ven Te Chow

Este método, que fue deducido con base en los conceptos de hidrogramas unitarios e hidrogramas unitarios sintéticos, es probablemente el más confiable de los métodos semiempíricos, por lo que debe aplicarse siempre que sea posible, particularmente para cuencas de hasta 25 km<sup>2</sup>, aunque también se puede aplicar en cuencas hasta 250 km<sup>2</sup>, considerando que a mayores dimensiones los resultados serán menos confiables (Chow *et al.*, 1994).

$$Qd = AXYZ$$

Dónde:

A=área de la cuenca;

X= factor de escurrimiento;

Y= factor climático;

Z= factor de reducción

Se considera un tiempo de retraso (tr) y se relaciona con el tiempo de concentración (tc) para obtener el factor de reducción (Z).

Aplicando las consideraciones anteriores, los caudales estimados para diferentes periodos de retorno mediante el método de Ven Te Chow son mostrados en la Tabla 26:

Tabla 26. Caudales máximos estimados por el método de Ven Te Chow

Tr	He (mm)	X	Q Max (m <sup>3</sup> /s)
1	36.632	2.231	925.350
2	86.045	5.240	2173.538
3	98.949	6.026	2499.508
4	108.605	6.614	2743.429
5	117.510	7.157	2968.358
10	137.497	8.374	3473.260
25	160.592	9.780	4056.630
50	176.564	10.753	4460.092
100	191.767	11.679	4844.131
200	206.425	12.572	5214.407
500	225.182	13.714	5688.224

### 3.7.4. Método del Hidrograma Unitario de Snyder

El presente método se basa en un estudio de cuencas localizadas en los montes Apalaches en los Estados Unidos y con tamaños de cuencas que variaban desde 30 a 30,000 km<sup>2</sup>, donde se encontraron relaciones sintéticas para algunas

características de un hidrograma unitario. A continuación, se describen las componentes del hidrograma unitario de Snyder (Morán, 2010)

El tiempo de rezago se define como el tiempo desde el centroide del histograma de precipitación efectiva hasta el caudal pico del hidrograma, el cual se calcula como:

$$t_r = \frac{L_c^{0.8}(S + 1)^{0.7}}{1900S_c^{0.5}}$$

Si el tiempo de rezago es mayor al tiempo de concentración, se utiliza:

$$t_r = 0.6t_c$$

En donde  $t_r$  es el tiempo de rezago en horas,  $S$  es el factor de retención calculado con base en el número de curva CN,  $L_c$  es la longitud del colector principal en pies,  $S_c$  es la pendiente de la cuenca en porcentaje y  $t_c$  en el tiempo de concentración en horas.

Para la duración de la lluvia, Snyder considero lluvias que estuvieran en función del tamaño de la cuenca, definiendo una relación de 1/5.5 veces el tiempo de rezago, tal como se muestra en la siguiente formula:

$$t_s = \frac{t_r}{5.5}$$

Donde  $t_s$  es la duración de la lluvia efectiva en horas y  $t_r$  es el tiempo de rezago en horas.

Para calcular el tiempo al pico, se utiliza la fórmula:

$$t_p = \frac{t_c}{2} + t_r$$

Donde  $t_p$  es el tiempo al pico en horas,  $t_c$  es el tiempo de concentración y  $t_r$  el tiempo de rezago en horas.

Para obtener el caudal pico por milla cuadrada  $u_p$ , cuando el hidrograma unitario coincide con la precipitación efectiva, puede estimarse utilizando:

$$u_p = C_p \frac{600}{t_r}$$

Donde  $u_p$  es el caudal pico por milla cuadrada,  $t_r$  es el tiempo de rezago y  $C_p$  es un coeficiente que considera la topografía, varía entre 0.5 y 0.8.

Sin embargo, cuando la precipitación efectiva no coincide con el tiempo pico, se utiliza la siguiente fórmula para estimar el caudal pico.

$$u_p = C_p \frac{640}{\left[ t_r + \frac{(t_c - t_s)}{4} \right]}$$

Donde  $t_s$  es la duración de la lluvia en horas y  $t_c$  es el tiempo de concentración.

Una vez obtenido el caudal pico por unidad de área, se puede obtener el caudal pico total para la cuenca, utilizando la fórmula (Morán, 2010) :

$$U_p = u_p * A$$

Donde  $A$  es el área de la cuenca en milla cuadradas.

Una vez teniendo los resultados del caudal total de la cuenca en millas cuadradas, se hace la conversión para obtener el caudal en  $m^3/s$  para hacer las comparaciones con los demás métodos semiempíricos utilizados para estimar caudales.

Los caudales estimados mediante el método de Snyder, se muestran en la Tabla 27

Tabla 27. Caudales máximos estimados por el método de Snyder.

Tr	He (in)	Q Max ( $m^3/s$ )
1	3.018	775.565
2	3.411	876.749
3	3.805	977.933
4	4.199	1079.117
5	4.653	1195.979
10	5.442	1398.664
25	6.353	1632.777
50	6.983	1794.655
100	7.582	1948.717
200	8.160	2097.240
500	8.900	2287.272



Para definir el hidrograma unitario de Snyder, se ubica la posición de dos puntos del hidrograma para facilitar su construcción, utilizando las siguientes ecuaciones:

$$W_{50} = \frac{770}{q_p^{1.08}}$$

$$W_{75} = \frac{440}{q_p^{1.08}}$$

Donde

$q_p$  = gasto pico en  $\text{pies}^3/\text{s} \cdot \text{in}$

$W_{50}$  = intervalo de tiempo en horas igual al 50% del caudal pico

$W_{75}$  = intervalo de tiempo en horas igual al 75% del caudal pico

Se muestra la forma del hidrograma unitario de Snyder, utilizando las ecuaciones  $W_{50}$  y  $W_{75}$  para generar y graficar el hidrograma.

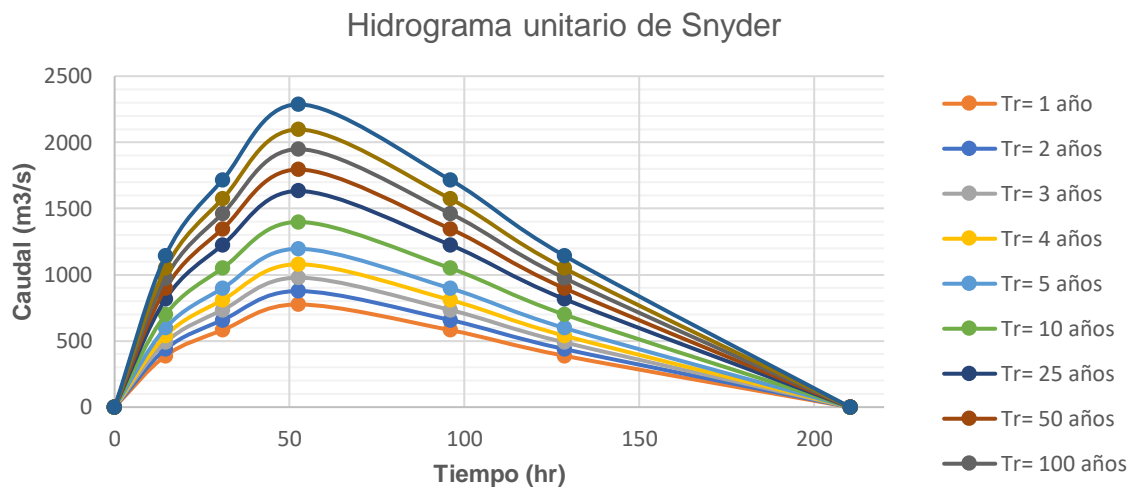


Figura 28. Hidrograma unitario de Snyder para diferentes periodos de retorno.

El hidrograma unitario de Snyder asociado a diferentes periodos de retorno (Figura 28), será utilizado para el análisis de inundaciones sobre el río Sinú, tramo Montería, Colombia.

### 3.8. Caudales de diseño para el análisis de inundaciones

Los métodos aplicados para la obtención de las avenidas de diseño, tienen como objetivo la reconstrucción matemática del proceso o fenómeno de la formación de la avenida, es decir, suponer una lluvia de duración y periodo de retorno

determinado, donde se calcula el escurrimiento que genera en un punto de la corriente estudiada hasta determinar el posible hidrograma de la avenida (Chow *et al.*, 1994).

Tabla 28. Caudales máximos seleccionados para el análisis de inundaciones.

Tr	Q Max (m <sup>3</sup> /s)
1	775.565
2	876.749
3	977.933
4	1079.117
5	1195.979
10	1398.664
25	1632.777
50	1794.655
100	1948.717
200	2097.240
500	2287.272

Los caudales máximos seleccionados para el análisis de inundaciones, corresponde a los estimados por el Método de Snyder (Tabla 28), que aplica para cuencas muy grandes, además de tener congruencia con los caudales máximos registrados en la estación limnigráfica de Montería, presentando similitudes entre los valores estimados y registrados.

El análisis de inundaciones será evaluado mediante los caudales asociados a periodos de retorno de 2, 3, 4, 5 y 10 años, ya que se podrá observar el comportamiento del cauce previo y posterior a la presencia de las inundaciones sobre el río Sinú, determinar puntos críticos donde se presenten los primeros desbordamientos y visualizar la extensión del agua bajo diferentes escenarios.

## 4. TOPOBATIMETRÍA DEL TRAMO DE ESTUDIO

La topobatimetría es un término utilizado para describir la vinculación, unión o empalme de información topográfica, que muestra el relieve de la superficie del suelo, e información batimétrica, para describir la forma de un cuerpo de agua, y conocer la profundidad por debajo de la superficie de un nivel de agua determinado.

En el presente capítulo se describe la metodología y resultados relacionados con la obtención de la topografía del sitio, el levantamiento batimétrico en el sitio del proyecto, así como el procedimiento para generar la topobatimetría del tramo de estudio.

### 4.1. Topografía

La topografía se ha definido como una ciencia aplicada, encargada de determinar la posición relativa de puntos sobre la Tierra, y la representación en un plano de una porción de la superficie terrestre. También, puede definirse como la disciplina que abarca todos los métodos para reunir información de partes físicas de la Tierra, como el relieve, litorales, cauces, entre otros, usando métodos de medición en terreno, la fotogrametría y sensores remotos (Rincón *et al.*, 2011).

La palabra topografía, proviene del griego *topo* – *topos* (lugar/región/sitio) y *grafía* – *graphie* (descripción), es un arte o ciencia, que trata los principios y métodos empleados para determinar las posiciones relativas de los puntos de la superficie terrestre, por medio de medidas, y usando los tres elementos del espacio (García, 1994).

La topografía está directamente relacionada con el estudio de la Tierra, si la tomamos como un cuerpo en el espacio, entonces su estudio corresponde a la Astronomía, y si se la toma como globo terráqueo, entonces su estudio corresponde a la Geodesia, relacionándose con diferentes campos de la ingeniería (Fuentes, 2012).

Dentro de las aplicaciones de la topografía en la ingeniería civil, se puede mencionar la proyección de obras, trazar fraccionamientos, proyectar presas, puentes, canales,

carreteras, obras de agua potable y alcantarillado, construcción de vías de comunicación, obras subterráneas, entre otros (Fuentes, 2012).

#### **4.1.1. Levantamiento topográfico**

Las actividades fundamentales de la topografía, son el trazo y el levantamiento topográfico, donde el trazo, es el procedimiento operacional que tiene como finalidad el replanteo sobre el terreno de las condiciones establecidas en un plano, mientras que el levantamiento, comprende las operaciones necesarias para la obtención de datos de campo, útiles para poder representar un terreno por medio de su figura semejante en un plano (García, 1994).

De acuerdo con Fuentes (2012), el trabajo topográfico consta de dos actividades, la medición de puntos de un terreno y el trabajo de gabinete, para llevar los datos a un plano o por el camino inverso desde un proyecto ubicar los puntos sobre el terreno.

El levantamiento topográfico, también se refiere al conjunto de operaciones que tienen por objeto determinar la posición de puntos en el espacio, y su representación en un plano, donde el conjunto de operaciones incluye la selección del método de levantamiento, la elección del equipo a utilizar, identificar y ubicar posibles vértices de apoyo, realizar mediciones de terreno, cálculo y procesamiento de datos y la elaboración de planos (Rincón *et al.*, 2011).

#### **4.1.2. Tipos de levantamiento topográfico**

Existen múltiples clasificaciones de los levantamientos topográficos, entre los más importantes, se encuentra (Rincón *et al.*, 2011):

- Levantamiento de terrenos en general: tiene por objeto marcar linderos, localizarlos, medir y dividir superficies, ubicar terrenos en planos generales, ligando con levantamientos anteriores o proyectar obras y construcciones.
- Topografía para vías de comunicación: sirve para estudiar y construir caminos, ferrocarriles, canales, líneas de transmisión, acueductos, etc.
- Topografía de minas: tiene por objeto fijar y controlar la posición de trabajos subterráneos, y relacionarlos con las obras superficiales.

- Levantamientos catastrales: normalmente se trata de levantamientos urbanos o rurales, con el propósito de localizar los linderos de las propiedades (agrícolas, mineras, acuicultura, derechos de agua) y las construcciones dentro de los predios.
- Levantamientos hidrográficos: levantamientos relacionados con la definición de deslindes de playas de mar, ríos, lagos, embalses y otros cuerpos de agua, así como con la configuración e irregularidades de sus profundidades (batimetría), utilizando instrumental topográfico clásico en la determinación planimetría y sofisticados instrumentos electrónicos para determinar sus profundidades.
- Levantamientos de ingeniería: incluye los trabajos topográficos requeridos antes, durante y después del término o cierre de los proyectos de ingeniería.
- Levantamientos aéreos: se hacen por medio de la fotografía, generalmente desde aviones y/o drones, y se usan como auxiliares muy valiosos de todas las otras clases de levantamientos. La fotogrametría se dedica especialmente al estudio de estos trabajos.

Para ubicar los puntos que se generan en los levantamientos topográficos, es necesario proyectarlos para transformar los datos registrados en campo, y poder plasmarlos sobre un plano o un mapa, para su posterior uso en aplicaciones asociadas a los tipos de levantamientos.

#### **4.1.3. Proyección cartográfica**

Un mapa es una proyección de datos, tomados de la Tierra, en una representación sobre un plano, por lo general, los mapas se crean mediante la transformación de datos del mundo real a una superficie esférica o elipsoidal, y finalmente a un plano. La transformación de una superficie curva a un plano se conoce como proyección cartográfica y puede asumir gran variedad de formas, esto implica distorsión de áreas, ángulos y/o distancias. El proceso de proyección se realiza en tres pasos (Lapaine Miljenko & Lynn Usery, 2013):

- Asimilación del tamaño y la forma del objeto a una forma matemática, como puede ser una esfera o elipsoide.
- Reducción de la escala de la representación matemática a un esferoide o elipsoide (un modelo reducido de la Tierra desde el que se realizan proyecciones de mapas) con la escala principal o nominal.
- Transferencia del esferoide o elipsoide al plano con ayuda de una proyección cartográfica.

Las proyecciones cartográficas dependen, en primer lugar, de la asunción de los parámetros específicos del propio objeto (de la Tierra), esférica o elipsoidal, el radio de la esfera y un datum específico o punto de partida, para la representación de un sistema de coordenadas (Figura 29).

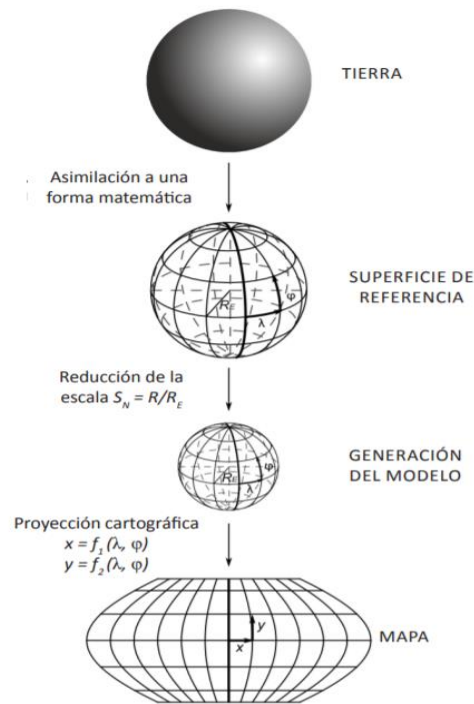


Figura 29. Proyección cartográfica de la Tierra mediante para generar un mapa. (Fuente: Canters, 2002).

Para el uso de los datos geoespaciales se necesita un marco de referencia común, y eso se suele resolver con un sistema de referencia plano. Los mapas se presentan en un sistema de geometría plana, las coordenadas esféricas o elipsoidales, generadas a partir de los sistemas de posicionamiento por satélite, o de cualquier

otro dispositivo de reconocimiento, deben ser transformadas matemáticamente al sistema de geometría plana.

El Sistema de Coordenadas Universal Transversal de Mercator (UTM) se basa en las proyecciones de husos de 6° de longitud, entre los paralelos de latitud 80°S a 84°N, cuyo factor escala es de 0,99946 para el meridiano central de cada zona UTM, y produce un error máximo de 1 parte en 2,500. En cambio, también se cuenta con el Sistema de la Cuadrícula Militar Universal (MGRS), las zonas polares al Norte de 84°N y al Sur de 80°S, se proyectan sobre la cuadrícula de la Proyección Universal Estereográfica Polar (UPS), con el Polo como el centro de proyección y un factor de escala 0,9994.

Las proyecciones se pueden clasificar en función de la geometría, forma, propiedades especiales, parámetros de proyección y nomenclatura. Se tiene una clasificación geométrica, que se basa en los patrones de la cuadrícula (la red de paralelos de latitud y meridianos de longitud). De acuerdo con esa clasificación, las proyecciones cartográficas a las que generalmente se hace referencia son las cilíndricas, las cónicas y las azimutales, entre otras (Lapaine Miljenko & Lynn Usery, 2013).

Para un modelado y análisis de datos geográficos, es necesario adquirir y descargar imágenes de satélite o fotografías, utilizando sistemas mundiales de navegación por satélite, que permiten determinar la localización y definir el sistema de coordenadas.

#### **4.1.4. Sistemas mundiales de navegación por satélite (GNSS)**

Un sistema de navegación por satélite, es un sistema de satélites que proporciona un posicionamiento geoespacial autónomo con cobertura global, que permite a pequeños receptores electrónicos determinar su localización (longitud, latitud y altitud), utilizando señales temporales de radio transmitidas a través de los satélites, donde los receptores calculan el instante de tiempo preciso, así como la posición. Un sistema de navegación por satélite con cobertura global, puede ser denominado sistema de navegación global por satélite o GNSS, algunos ejemplos son, el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) NAVSTAR de los Estados Unidos, el

GLONASS ruso, y el Galileo de la Unión Europea, todos estos son GNSS operativos a nivel global.

La cobertura mundial de cada sistema se consigue generalmente mediante una constelación de 20 a 30 satélites en órbita terrestre media, posicionados a lo largo de varios planos orbitales. Los sistemas actuales utilizan inclinaciones orbitales de más de 50° y períodos orbitales de aproximadamente doce horas, a una altitud de unos 20.000 kilómetros (Lapaine Miljenko & Lynn Usery, 2013).

#### **4.1.5. Sensores remotos**

Los sensores remotos o teledetección es la ciencia y arte de obtener información de un objeto, área o fenómeno, a través del análisis de datos adquiridos mediante un dispositivo, el cual no está en contacto directo con el objeto, área o fenómeno. La obtención de los datos, involucra el uso de instrumentos llamados sensores, capaces de ver, o captar las relaciones espectrales y espaciales de objetos, y materiales observables a una considerable distancia de aquellos.

Los dispositivos de los sensores remotos, pueden detectar varios tipos de energía, como la radiación electromagnética, gravedad, magnetismo, geofísica y ondas de radio, por lo general, la fuente de energía más común en sensores remotos para registrar los datos de la superficie terrestre, es a partir de las distribuciones de energía dentro del *Espectro Electromagnético* (EEM). Es común adquirir datos a partir de la emisión y reflexión de la *Radiación Electromagnética* (REM), debido a los atributos de la superficie terrestre (Pérez, 2007).

Los sensores remotos capaces de obtener datos a partir de la energía electromagnética, son instrumentos que pueden ser colocados en plataformas orbitales, llamados satélites o, ser transportados en aviones. Estas características pueden determinar la resolución (espacial y espectral) produciendo una variedad en los datos.

Los datos obtenidos a partir de sensores remotos, ya sea mediante sensores de percepción pasiva o activa, permiten adquirir información confiable sobre superficies extensas, a costos razonables; sus principales aplicaciones surgen en la



construcción de mapas, planos, interpretación de recursos y superficies, planificación territorial, estudios urbanos (Rodríguez & Arredondo, 2005).

#### **4.1.6. Sensores activos**

Los sensores remotos activos, son los encargados de obtener información de la energía electromagnética, proveniente de fuentes artificiales para grabarla y analizarla. La característica primordial de los sensores activos, es la capacidad de proporcionar el haz energético, que luego capta tras su reflexión sobre la superficie a observar (Rodríguez & Arredondo, 2005).

Los sensores activos poseen su propia fuente de radiación de energía, y no depende de una fuente externa para irradiar la superficie de la tierra. El sensor emite un flujo de radiación, en determinada faja espectral que interactúa con la superficie de la Tierra, y la parte que refleja es captada por el sensor, algunos ejemplos son los radares, radiómetros de microondas, y cámaras fotográficas.

El Radar es uno de los sensores activos más conocidos, trabaja en el rango de las microondas (1cm a 1m), donde la variedad de sus bandas le permiten identificar objetos con diferentes características, resaltando el brillo, textura y tonalidad (Rodríguez & Arredondo, 2005).

#### **4.1.7. Sensores pasivos**

Los sensores remotos pasivos son los encargados de obtener información de la energía electromagnética, proveniente de fuentes naturales, reflejada por la superficie de la tierra, estos se distribuyen entre los fotográficos, óptico- electrónicos y de antena; en el primer grupo, están las cámaras fotográficas, en el segundo, los exploradores de barrido, empuje y cámaras de vidicon, y en el tercero, los radiómetros de microondas (Rodríguez & Arredondo, 2005)

También, se puede definir a los sensores pasivos, como aquellos que detectan y miden la radiación electromagnética, reflejada o emitida por la superficie terrestre, que proviene de una fuente externa. Estos sensores no poseen radiación propia y

dependen de una fuente de iluminación externa como el sol. Algunos ejemplos son el *Landsat Thematic Mapper* (MSS, TM), SPOT, entre otros (Pérez, 2007).

El uso de sensores remotos, activos o pasivos, permite adquirir información confiable de la superficie terrestre, datos altimétricos, e identificar el relieve sobre determinada zona de interés, obteniendo modelos digitales de elevación, cuya aplicación en la ingeniería civil permite el desarrollo de estudios y proyectos de infraestructura.

#### **4.1.8. Modelos digitales de elevación**

Los modelos digitales de elevación (MDE), son representaciones visuales y matemáticas de los valores de altura, con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve, y los elementos u objetos presentes en el mismo (Santaella, 2016).

Un modelo digital de elevaciones también puede definirse, como una estructura numérica de datos, que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno. Un MDE puede describirse de forma genérica del modo siguiente (Sarría, 2007):

$$z = f(x, y)$$

donde

$z$  = la altitud del punto situado en las coordenadas  $(x, y)$ , que se relaciona la variable con su localización geográfica.

$x, y$  = son las abscisas y ordenadas de un sistema de coordenadas plano, habitualmente de un sistema de proyección cartográfica.

Los modelos de datos para la representación de los MDE, pueden ser vectoriales, donde se encuentran las curvas de nivel, los perfiles y la red de triángulos irregulares (TIN); así como datos raster, donde se encuentran las matrices de celdas regulares, con cotas sobre una malla equidistante (Burgos & Salcedo, 2016).

A partir de los modelos digitales de elevación, es posible obtener datos de apoyo para el cumplimiento de objetivos, toma de decisiones y desarrollo de proyectos

relacionados con el relieve, corrientes de agua, mapas de pendientes, mapa de sombras, modelos vectoriales de la altura de los elementos presentes en el terreno, entre otros.

En la actualidad, los modelos constituyen un medio para lograr la representación del relieve muy versátil y funcional, para conocer la conformación, o superficie del terreno, y los elementos de origen antrópico, así como la vegetación presente en el mismo (Santaella, 2016).

#### **4.1.9. Modelo digital de superficie (MDS)**

Los modelos digitales de superficie representan todos los elementos existentes o presentes en la superficie de la tierra, como la vegetación, edificaciones, infraestructura y el terreno propiamente (Santaella, 2016)

Este tipo de modelo, también puede definirse como la representación de las elevaciones sobre el nivel del mar de las superficies reflectantes de árboles, edificios y otras características elevadas sobre la tierra desnuda. Un MDS captura y muestra las características naturales, construidas en la superficie de la Tierra.

La utilidad de estos modelos se aplica para el modelado 3D, para telecomunicaciones, planificación urbana y aviación, por ejemplo, es posible determinar las obstrucciones de las pistas de aterrizaje en la zona de aproximación para la aviación, verificar cómo un edificio puede afectar sobre determinada zona urbana, así como tener un manejo de la vegetación (GIS Resources, 2013).

#### **4.1.10. Modelo digital de terreno (MDT)**

El modelo digital del terreno (MDT) recrea la forma del terreno una vez que fueron removidos todos los elementos ajenos al mismo como son la vegetación, edificaciones, y demás elementos que no forman parte del terreno (Santaella, 2016).

Estos modelos pueden definirse como una representación tridimensional de una superficie del terreno, almacenadas en forma digital, donde no solo se incluye las elevaciones, sino también otros elementos geográficos y características naturales como ríos, líneas de crestas, entre otros (GIS Resources, 2013).

Los datos obtenidos a partir de MDT permiten realizar procesos de simulación del funcionamiento de un sistema dinámico real, manipulando los datos del MDT o complementándolos con otras descripciones de fenómenos físicos, que dependen de las propiedades del terreno, y realizar una simulación numérica. Por este camino, pueden elaborarse modelos de previsión de fenómenos de interés y, si se tiene la posibilidad de confrontar los resultados con la realidad, se hace posible el perfeccionamiento del modelo mediante ajustes sucesivos (Felicísimo, 1994).

Para el desarrollo de este proyecto, se utiliza un MDT para representar el relieve sobre la zona de estudio, adquiriendo información del terreno derivada del satélite ALOS PALSAR, así como datos altimétricos del *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM) obtenidos de la NASA. Estos modelos, permiten analizar la topografía, en diferentes resoluciones espaciales, para el análisis de inundaciones sobre la zona urbana de Montería, Colombia.

#### **4.1.11. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)**

El conjunto de datos de la Misión Topográfica de Radar en Transbordador (*Shuttle Radar Topography Mission* - SRTM, por sus siglas en inglés) es resultado de un proyecto internacional, llevado a cabo en colaboración con la *U.S. National Aeronautics and Space Administration* (NASA), el *German Aerospace Center* (DLR), la *Italian Space Agency* (ASI) y la *U.S. National Geospatial Intelligence Agency* (NGA) (Farr *et al.*, 2007).

El objetivo principal de la misión SRTM fue obtener un modelo digital de elevaciones global de alta resolución y calidad uniforme, a partir de datos recolectados con la técnica de interferometría radar de apertura sintética.

Los datos InSAR (*Interferometric Synthetic Aperture Radar*) fueron obtenidos en once días (11 al 22 de febrero de 2000), por dos sistemas de radar, banda C (SIR-C) y banda-X (X-SAR), montados en el transbordador espacial *Endeavor*. Por un lado, el *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) dependiente de la NASA, generaron un modelo digital de elevaciones entre las latitudes 56° S y 60° N, operando en banda

C en modo ScanSAR, cubriendo un ancho de faja de 225 km. El DLR opera un sistema en banda X con un ancho de faja de 50 km (SRTM, 2015).

Las bandas C y X fueron procesadas de manera independiente. La primera banda fue distribuida públicamente, con resolución espacial de 1" de arco (~30 m) para Estados Unidos y reducida a 3" (~90 m) para el resto del mundo. Luego la NGA, hace el postproceso del MDE de banda C, creado por el JPL, y es responsable de las distintas versiones circulantes (Farr *et al.*, 2007).

Para el presente proyecto se descarga un MDE de la plataforma *Consortium for Spatial Information* (CGIAR CSI) de datos altimétricos, obtenidos del SRTM, corregidos de manera combinada con datos ASTER, GMTED2010 y NED, correspondientes al mosaico 21/11. Se extraen los datos altimétricos, correspondientes a la zona urbana de Montería, donde se ubica la zona de estudio, y se proyectan al sistema de coordenadas Universal Transversa de Mercator, Zona 18N, considerando una resolución espacial de 1" de arco o un tamaño de píxel de 30 metros (Figura 30).

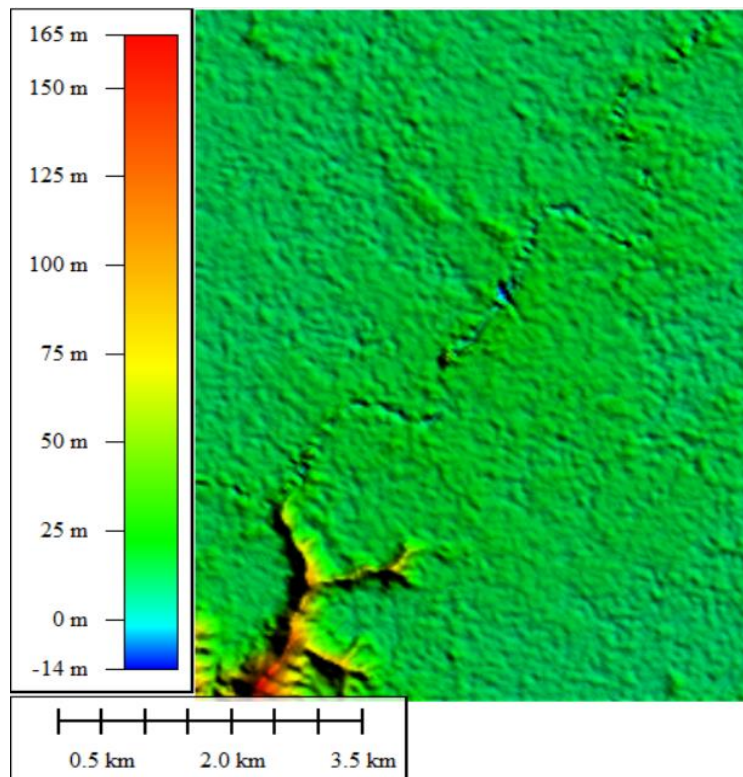


Figura 30. Modelo digital de elevación descargado de la base de datos SRTM, resolución de 30 metros.

#### 4.1.12. ALOS PALSAR

El satélite ALOS fue lanzado por la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA) en enero de 2006, durante su operación (May 16, 2006 – April 22, 2011), pudo recolectar imágenes de Radar, en escenas de 50 km x 70 km, de todo el planeta, cada 45 días aproximadamente, a través de su sensor PALSAR (*Phased Array Type L-band Synthetic Aperture Radar*) (IDE Chile, 2019)

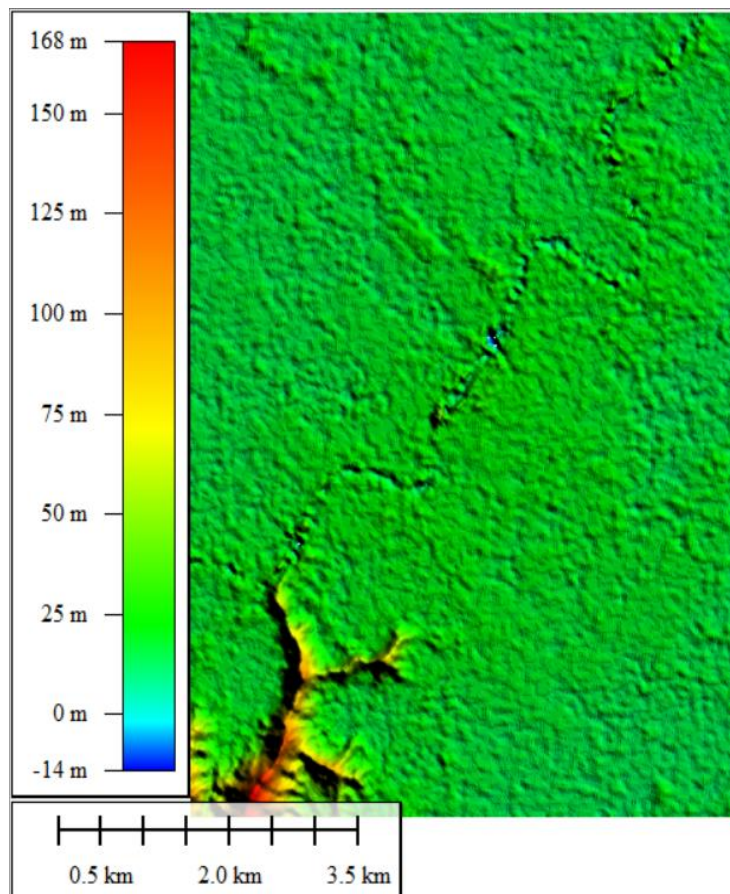
Los modelos digitales de elevación adquiridos a través del satélite son uno de los múltiples recursos cartográficos disponibles, dentro de los productos que muestran la distribución espacial del territorio. El satélite ALOS (*Advanced Land Observation Satellite*) también conocido como DAICHI, lleva a bordo tres sensores: el PRISM para imágenes pancromáticas, el radar de apertura sintética PALSAR y el radiómetro AVNIR (Meza, 2020).

Entre los antecedentes técnicos, para determinar la altura geoidal al nivel medio del mar, se utiliza un modelo Geoidal EGM2008 mundial, que registra las diferencias entre el geoide y en nivel medio del mar, con píxeles de 1 segundo de arco (30 metros). Las diferencias geoidales se les restan a los valores de altitud del MDE, recortando el modelo con el límite regional y exportando los resultados para su análisis (IDE Chile, 2019)

El MDE ALOS PALSAR, es uno de los productos ofrecidos por la *Alaska Satellite Facility* (ASF), en el contexto de las imágenes ALOS PALSAR, que utiliza radar de apertura sintética (SAR) en banda L de PALSAR, para realizar una observación detallada, en cualquier condición climática, durante el día y la noche, así como una interferometría de paso repetido, estos modelos de elevación poseen un tamaño de pixel de 12.5 m (ASF, 2020).

Para el presente proyecto se descarga un MDE de la plataforma *Alaska Satellite Facility*, ingresando al *Data Search Vertex*, obteniendo un conjunto de datos del satélite ALOS PALSAR, que contiene información altimétrica del terreno a una resolución espacial de 12.5 metros por píxel. Se extraen datos raster

correspondientes a la zona urbana de Montería, Colombia, donde se ubica el tramo de estudio, y se proyectaron al sistema de coordenadas UTM18N.



*Figura 31. Modelo digital de elevación, base de datos ALOS PALSAR, resolución de 12.5 metros.*

El modelo digital de elevación, extraído del conjunto de datos de ALOS PALSAR, con resolución espacial de 12.5 metros por píxel, corresponde a la topografía seleccionada para su procesamiento, y empalme con la batimetría del tramo de estudio. El MDE es el resulta ser el conjunto de datos altimétricos de menor resolución espacial y de acceso gratuito, para la zona de estudio en Montería, Departamento de Córdoba, Colombia (Figura 31).

## 4.2. Batimetría

El término batimetría, proviene del griego, y se define como el arte de medir las profundidades, en topografía, se entiende como un levantamiento del relieve de superficies subacuáticas (fondo del mar, embalses, cursos de agua, entre otros).

Los levantamientos batimétricos, al igual que los convencionales, buscan obtener las coordenadas (x, y, z) de todos los puntos. La diferencia entre ellos, es su mayor complejidad a la hora de obtener la profundidad. El proceso para obtener profundidades, se le denomina sondeo o sondar, y consiste en determinar la distancia entre la lámina de agua y la superficie del fondo, a través de equipo especializado, para determinar la componente vertical sobre los cuerpos de agua (Farjas, 2005).

Las aplicaciones de los levantamientos batimétricos, permiten estimar los volúmenes almacenados en los cuerpos de agua, conocer la dinámica de los lechos de ríos identificando zonas de socavación y áreas de depósito; también, ofrecen información para la navegación en grandes ríos. Particularmente, los levantamientos batimétricos, son insumo indispensable para aplicar cualquier software de modelación hidráulica, lo cual permite evaluar el tránsito de crecientes con fines de pronóstico hidrológico (IDEAM, 2014).

Se han desarrollado tecnologías, enfocadas en el empleo de equipos con observaciones satelitales (GPS) y determinación de la profundidad, por técnicas de sónicas digitales, utilizando equipo de cómputo para gestionar los datos de los equipos de sondeo. El desarrollo técnico reduce las tareas en el levantamiento batimétrico, aminorando gastos, reduciendo tiempos de ejecución y mejorando la precisión de las coordenadas (Rollnic, 2009).

Para obtener las coordenadas de los puntos de fondo, se utilizan métodos de posicionamiento planimétrico, altimétrico, y en tercera dimensión para la correcta georreferenciación de los puntos correspondientes, a la profundidad del cuerpo de agua.



#### **4.2.1. Métodos topográficos en batimetría**

Se tienen diferentes métodos de trabajo para los trabajos batimétricos, donde se toman datos precisos de los cuerpos de agua, que buscan determinar las coordenadas (x, y, z) de los puntos de fondo. Las metodologías de trabajo, resultan en la obtención de datos en planimetría de la altimetría, observando en cada punto la situación horizontal y la profundidad, haciendo el uso de GPS, y medios electrónicos para la gestión de datos.

Se hace uso de la georreferenciación para determinar con precisión la posición de bases sobre el terreno, cercana a la zona de trabajo, las cuales pueden estar referidas a vértices geodésicos, u otros, todo ello dependerá de la distancia a la zona de trabajo, los vértices geodésicos y las necesidades del trabajo.

El uso de métodos altimétricos, permite referenciar las altitudes de los vértices de la red altimétrica, referenciándolos a la superficie del nivel medio del mar, y junto a las coordenadas definidas de los puntos de fondo, se puede representar los perfiles del terreno y secciones transversales sobre los cuerpos de agua (Rollnic, 2009).

#### **4.2.2. Método de posicionamiento planimétrico**

El posicionamiento planimétrico en los trabajos de batimetría, para determinar la ubicación de un punto en el fondo de un cuerpo de agua, requiere levantar el perfil en función de la densidad de puntos del levantamiento, y dentro del perfil, determinar las coordenadas (x, y) sobre el tramo de estudio. Los métodos de posicionamiento para obtener las coordenadas, utilizan diferentes técnicas que han evolucionado por el avance de las tecnologías (Rollnic, 2009).

- Métodos directos. Es el método más básico y menos preciso, consiste en materializar mediante una cuerda la alineación de los puntos a levantar. Está limitado por las dimensiones de los trabajos y la precisión requerida.
- Métodos ópticos. Consiste en medir sextantes, el ángulo que forman en el punto dos referencias conocidas, y así deducir la posición de la embarcación por intersección inversa. Este método obtiene precisiones de 3 a 5 metros, siendo un sistema de alto costo.

- Radiación. Se estaciona la estación total en tierra, en un punto de coordenadas conocido, se orienta el aparato visando a otro punto, del cual conocemos sus coordenadas. Se recorre el perfil deseado y se observan los puntos de la embarcación sobre los cuales se determina su profundidad. La estación total toma ángulos horizontales, verticales y distancias. Las operaciones de toma de datos se hacen desde tierra y el sondeo se realiza de forma simultaneo, ya que la embarcación está en movimiento.
- GPS. Los equipos de GPS han hecho posible la aplicación de observaciones a satélites en la determinación de la posición de puntos en la superficie terrestre o embarcaciones. Se tienen escasos tiempos de observación con alta precisión.

#### **4.2.3. Métodos de posicionamiento altimétrico**

La determinación del posicionamiento altimétrico, consiste en determinar la cota de los puntos, midiendo la distancia vertical existente, entre la superficie de agua y el punto en el fondo. Estas cotas, se refieren a las coordenadas (x, y) del punto donde se está tomando la profundidad. A la determinación altimétrica del relieve sobre un cuerpo de agua, se le denomina sondeo o sondar.

El sondeo permite conocer el relieve de las profundidades sobre un cuerpo de agua, considerando linealmente crecientes, dos puntos de profundidad determinada. El instrumento que se utiliza para los levantamientos, se denomina SONAR (*Sound Navigation and Ranging*), estos grabar información de transmisiones bajo el agua, mediante un emisor de ondas de sonido, y un receptor, siendo posible registrar las ondas que rebotan sobre el material de fondo (IDEAM, 2014).

Para el presente proyecto, se utiliza una ecosonda Garmin Echomap 73 SV para el levantamiento batimétrico sobre el tramo de estudio. Las sondas acústicas o ecosondas, permiten una mayor rapidez en el levantamiento, y registran una adecuada representación del fondo. Estos equipos, registran el tiempo que transcurre desde que un impulso sonoro es emitido desde la embarcación, hasta registrar nuevamente, al reflejarse en el fondo. Existen diferentes modelos, aptos

para diferentes profundidades, registrando profundidades mínimas de 30 centímetros, hasta profundidades máximas del rango de los 10 a los 12 kilómetros.

El uso del GPS al mismo tiempo que la ecosonda, permite ubicar la posición y profundidad de los puntos registrados en el levantamiento batimétrico, sobre el tramo de estudio. Al mismo tiempo, es posible verificar los resultados con la elevación de la estación pluviométrica, que muestra la elevación de la superficie de agua sobre el río Sinú.

#### **4.2.4. Campañas de medición batimétrica**

En el presente proyecto de investigación, por motivos de restricciones para realizar actividades de investigación sobre el tramo de estudio, en la ciudad de Montería, Depto. de Córdoba, Colombia, restricciones asociadas a la pandemia del coronavirus (COVID-19), se realizó solo una campaña de medición, durante el mes de Mayo de 2020, periodo considerado como época de transición, entre la temporada de secas y la temporada de lluvias. De acuerdo con los registro de precipitación, se considera como inicio de lluvias al mes de mayo, y se extiende hasta noviembre, mientras que la temporada seca, comprende los meses de noviembre hasta abril; en general, el mes más húmedo es junio, y los más secos son enero y febrero.

El objetivo de los trabajos en las campañas de medición fue determinar las profundidades del fondo del cauce, e identificar las características topográficas del río Sinú, su relieve, perfiles y secciones transversales.

#### **4.2.5. Metodología de trabajo**

Para la planeación de la campaña de medición, se contó con la asesoría del Dr. Franklin Manuel Torres Bejarano, catedrático de la Universidad de Córdoba, quien ha realizado levantamientos batimétricos previos, y conoce la zona de estudio.

Primero, se contactó con locales, encargados de la movilidad sobre el río Sinú, y se consideró en la planeación el registro de las actividades extractivas, y las obras de infraestructura sobre el tramo de estudio.

La campaña de medición fue realizada el 28 de mayo de 2020, iniciando en la zona de Sierra Chiquita, y finalizando el levantamiento sobre la Universidad de Córdoba, teniendo un recorrido aproximado de 11 km, para obtener las profundidades del cauce.

Para la planeación las campañas de medición, se utiliza el equipo disponible, y se toman en cuenta las restricciones de movilidad por la pandemia, elaborando un plan de trabajo, buscando la mejor ruta y trazo para realizar el levantamiento batimétrico, describiendo las actividades para el registro de la profundidad del fondo, y el post procesamiento de los datos.

#### **4.2.6. Equipo de trabajo**

Los equipos requeridos para llevar a cabo el levantamiento batimétrico sobre el río Sinú, son aquellos utilizados para navegar sobre el cauce, tomar las profundidades mediante una ecosonda, obtener la coordenada del fondo del cauce, y registrar la ubicación planimétrica de puntos de interés.

Se utilizó una embarcación para 10 pasajeros, con una longitud de 10 metros y 2.5 metros de ancho (Figura 32), permitiendo la movilidad sobre la embarcación, para operar los demás equipos, realizar las conexiones y dar acomodo al cableado.



*Figura 32. Embarcación utilizada en las campañas de medición sobre el río Sinú.*

La fuente de poder es una batería de 12 volts (Figura 33), donde se conecta la ecosonda directamente a la batería para automóvil, siendo protegida y resguardada, evitando que se pueda salpicar o mover por el movimiento de la embarcación.



Figura 33. Batería de 12 volts utilizada para conectar la ecosonda.

La Ecosonda Garmin Echomap 73 SV (Figura 34), se utiliza para obtener los puntos de fondo, e identificar las profundidades dentro del equipo, siendo capaz de registrar hasta 50 mil puntos. Se tiene una sonda de exploración, que proporciona información del fondo, muestra a detalle las estructuras y relieve del cauce. Es posible preinstalar mapas, para identificar los contornos del río, y definir una profundidad mínima para su registro.



Figura 34. Ecosonda Garmin Echomap 73 SV.

El equipo para registrar puntos de interés es un GPS, marca GARMIN GPSMAP 60CSX (Figura 35), utilizado comúnmente para trabajos de topografía y medición, resistente al agua, con receptor de alta sensibilidad, antena cuadrifilar helicoidal y compatibilidad con varios sistemas GNSS (GPS, GLONASS y Galileo). El equipo GPS, ofrece una brújula de tres ejes con altímetro barométrico, permitiendo obtener la ubicación de un punto con rapidez y precisión.



*Figura 35. GPS GARMIN GPSMAP 60CSX*

Los equipos de trabajo descritos previamente, son herramientas utilizadas durante el levantamiento batimétrico, siendo importante entender cómo utilizar las herramientas de trabajo, hacer uso de manuales para registrar adecuadamente los puntos, revisar el buen funcionamiento de los equipos, contar con el cableado necesario, verificando las comunicaciones entre los equipos, y realizar la medición de forma segura.

#### **4.2.7. Elaboración del plan de trabajo**

Para la elaboración del plan de trabajo, se identifican las necesidades para realizar las campañas de medición, el equipo de trabajo, la disponibilidad de embarcaciones,

y permisos por parte del gobierno, para realizar las actividades de investigación sobre el cauce.

Se planteó un recorrido desde Sierra Chiquita hasta la Universidad de Córdoba, correspondiente a una distancia de 11 km en línea recta, para lo cual, se proyectan transectos con separaciones de 70 metros para el registro de las profundidades, considerando una velocidad de la embarcación de 5 km/h para la toma de puntos, y un tiempo de 4 horas para completar el recorrido (Figura 36).



Figura 36. Recorrido proyectado para la campaña de medición sobre el río Sinú.

La ecosonda es utilizada sobre los márgenes del río, para tener registro de profundidades en las orillas del cauce. Se considera la toma de puntos GPS de sitios de extracción y descarga de aguas, así como obras hidráulicas y ubicación de las actividades extractivas.

En relación con la velocidad de navegación, se considera una velocidad baja (5km/h), para evitar distorsiones en los registros de las profundidades, buscando que la embarcación sea estable para evitar error en las mediciones.

#### 4.2.8. Trabajo de campo

La campaña de medición batimétrica se llevó a cabo el 28 de mayo de 2021, sobre el tramo de estudio en el río Sinú, desembarcando en el centro de la ciudad de Montería, avanzando aguas arriba hacia la zona de Sierra Chiquita, iniciando el recorrido de los transectos proyectados, desde la planeación de las campañas de medición.

Se registran 8500 puntos con la profundidad del cauce, se mantiene una velocidad aproximada de 5 km/h, acercando la embarcación a los márgenes para tener registro de las profundidades en la orilla del cauce (Figura 37).



*Figura 37. Registro de profundidades en márgenes del río Sinú.*

En el recorrido, se identificaron sitios donde se realizan extracciones y descargas de agua, tomando su ubicación con GPS, así como evidencia fotográfica de las obras (Figura 38). Los caudales de toma y descarga se consideran pequeños, en comparación con el caudal estimado para el río Sinú, por lo anterior, se desprecian las extracciones y descargas, para el análisis del comportamiento del hidrodinámico del flujo sobre el cauce.





Figura 38. Obras de toma y descarga sobre el río Sinú.

Se identifican dos obras hidráulicas de cruce (Figura 39), correspondientes a puentes vehiculares que cruzan el río Sinú, aguas arriba, se ubica el Puente Gustavo Rojas Pinilla, y aguas abajo, se ubica el Puente Segundo Centenario, estas estructuras desplantan sobre el cauce y orillas del río.



Figura 39. Estructuras de cruce sobre el río Sinú.

Durante las campañas de medición, se detectaron actividades extractivas sobre el río Sinú (Figura 40), denominados como “Areneros”, estos extraen manualmente material producto del fondo del cauce, depositando el material sobre una embarcación y descargando sobre la orilla del río, para su venta y distribución.



*Figura 40. Actividades de extracción sobre el río Sinú.*

Sobre los márgenes del cauce, se encuentran espigones formados con sacos de arena y hexápodos de concreto, taludes naturales, enrocados y protegidos por neumáticos usados, así como pilotes de acero, para evitar la erosión sobre un talud colindante al Parque Lineal, Ronda Norte del Sinú (Figura 41).



*Figura 41. Obras de protección sobre el río Sinú.*

#### 4.2.9. Batimetría del río Sinú

Para generar la batimetría correspondiente al tramo de estudio, sobre la ciudad de Montería, Departamento de Córdoba, Colombia, se descargan y procesan los puntos registrados por el ecosonda, corrigiendo las profundidades de los puntos utilizando la estación Montería, ubicada bajo el Puente Gustavo Rojas Pinilla, que registro una elevación de 15.1 m.s.n.m. durante las campañas de medición.

Para el presente proyecto, resultado de la batimetría del río Sinú, se obtiene una nube de puntos, que contienen coordenadas planimétricas y altimétricas (x, y, z) sobre el cauce, las cuales son utilizadas para crear la topobatimetría del sitio, al empalar la topografía de la zona, junto a la batimetría obtenida a partir de las campañas de medición (Figura 42).



Figura 42. Levantamiento batimétrico del río Sinú.

### 4.3. Topobatimetría

La topobatimetría es considerada como una combinación de datos correspondientes a la topografía, y batimetría de una zona de interés, donde se representan las superficies del terreno sobre el nivel del espejo del agua, junto a la representación del relieve del fondo de un cuerpo de agua.

Un levantamiento topobatimétrico, es una carta de representación de las características topográficas del lecho marino, del cauce de un río o del fondo de un cuerpo de agua (Figura 43). A diferencia de los levantamientos topográficos, en los levantamientos topobatimétricos, es la determinación de la altura, profundidad, posición planimétrica, se hace utilizando distintos métodos y equipos, en función del tipo y extensión de la superficie a representar, así como la profundidad del lecho del río, lago, embalse o mar (IMTA, 2015).

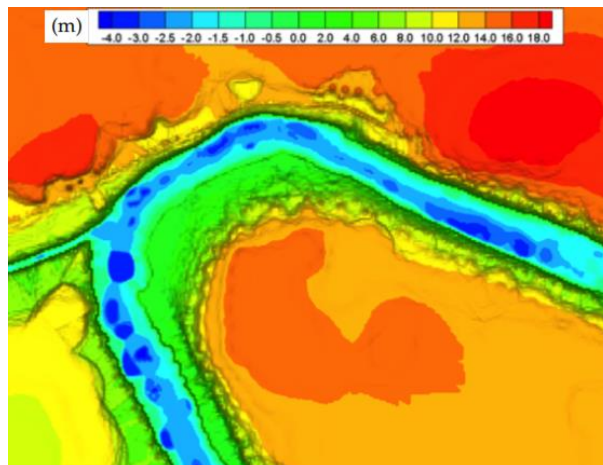


Figura 43. Representación topobatimétrica del río Tampaón, S.L.P., (Fuente: Rodríguez-Cuevas et al., 2019)

A partir del trabajo realizado en campo, se elaboran planos donde se puede demostrar las curvas isobaras (curvas de igual profundidad) o curvas de nivel (curvas de igual cota).

El análisis topobatimétrico, tiene la característica de ser un levantamiento puntual, esto quiere decir que, se pueden elegir todos y cada uno los puntos que creemos fundamentales para el levantamiento, mientras que, en un estudio batimétrico, la

selección de los puntos es aleatoria, lo que posibilita que una profundidad de interés no sea tomada sobre la zona de estudio (IMTA, 2015).

Dentro del presente proyecto de investigación, se obtuvieron datos topográficos de la zona de estudio, producto del satélite ALOS PALSAR DEM, con resolución de 12.5 metros por píxel; mientras que, los datos batimétricos del cauce son un conjunto de 8500 puntos de fondo del río Sinú, generados a partir de campañas de medición.

Para generar la topobatimetría del tramo de estudio, se muestran los procedimientos para empalmar la información topográfica y batimétrica, mediante procesos de interpolación, utilizando ArcMap para el procesamiento y representación de resultados.

#### **4.3.1. Proceso de interpolación**

El método de interpolación está diseñado específicamente para la creación de modelos digitales de elevación (MDE) hidrológicamente correctos. Se basa en un el programa ANUDEM, desarrollado por Michael Hutchinson. Este método interpola valores de elevación, para un ráster a la vez, que impone restricciones que garantizan una estructura de drenaje conectado, y una correcta representación de crestas y arroyos, a partir de los datos de curvas de nivel de entrada (Hutchinson *et al.*, 2011).

Para el presente proyecto, se busca el empalme la información topográfica, y batimétrica de la zona de estudio, mediante la interpolación de los datos, para la creación de un MDE, que permita modelar el comportamiento hidráulico del río, para lo cual, se utiliza la herramienta *topo to raster*, que se basa en el método de interpolación anterior.

El proceso de interpolación basado en ANUDEM, utiliza una técnica de interpolación de diferencia finita iterativa. Se optimiza para tener la eficacia computacional de los métodos de interpolación local como la interpolación de distancia inversa ponderada (IDW), sin perder la continuidad de la superficie de los métodos de interpolación global, como *Kriging* y *Spline*. Es una técnica de *Spline* de lámina delgada

discretizada, a la cual se le modifica la penalización por rugosidad para permitir que el DEM ajustado siga los cambios abruptos en el terreno como arroyos, crestas y acantilados (ESRI, 2021)

La herramienta *topo to raster*, utiliza los conocimientos sobre superficies e impone restricciones en el proceso de interpolación, que resultan en una estructura de drenaje conectada, y corrigen la representación de crestas y arroyos. Esta condición de drenaje, produce superficies con mayor precisión y menos datos de entrada. El programa, actúa de manera conservadora en la eliminación de sumideros, y no impone condiciones de drenaje en las ubicaciones que podrían contradecir los datos de elevación de entrada (ESRI, 2021).

Se establece una metodología de trabajo para la creación de un MDE, correspondiente a la topobatimetría de un sitio de estudio, que integra e interpola los datos de topografía y batimetría, mediante el uso de las herramientas de ArcGIS, para el análisis de datos planimétricos y altimétricos, asociados a superficies con elevaciones de una determinada zona de interés.

#### **4.3.2. Metodología de trabajo**

La metodología para el empalme e interpolación de la información topográfica y batimétrica, se realiza en ArcGIS para implementar el método de interpolación basado en el programa ANUDEM, desarrollado por Michael Hutchinson (2011).



Figura 44. Datos altimétricos del MDE ALOS PALSAR, resolución 12.5 metros.

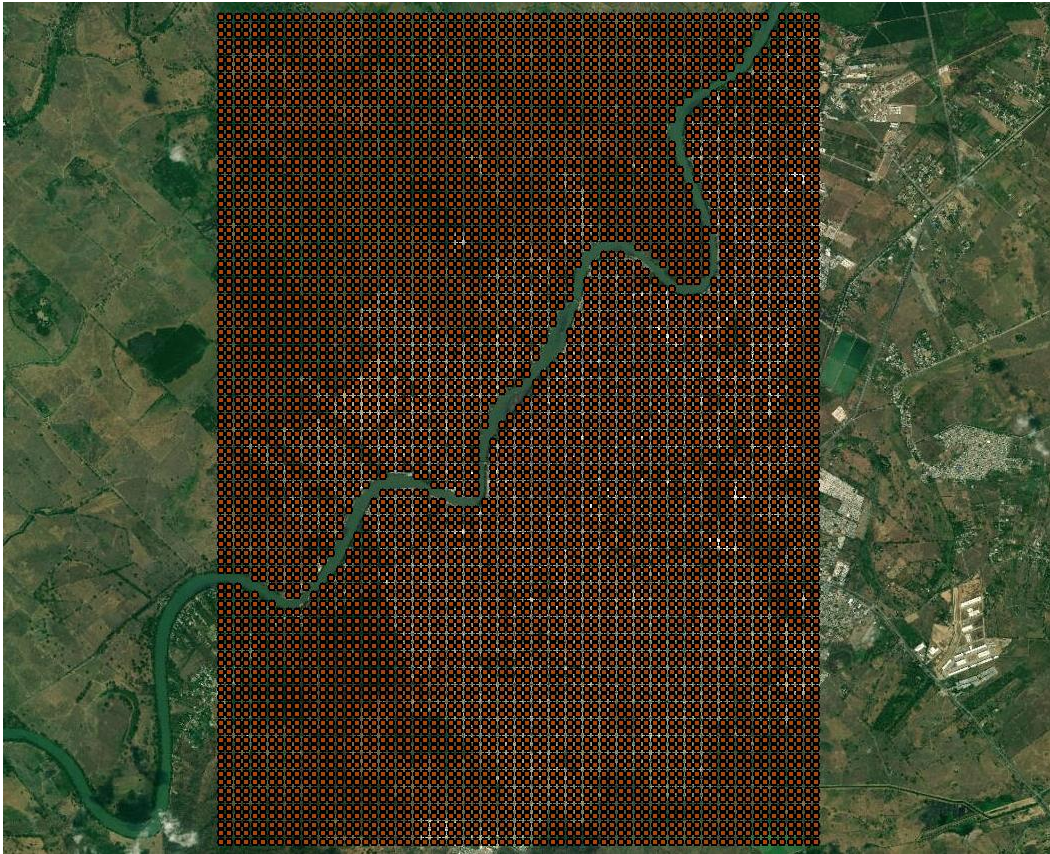
La topografía del sitio, se extrae del modelo digital de elevación (MDE), descargado del conjunto de datos de ALOS PALSAR DEM, con resolución espacial de 12.5 metros por píxel, recortando el área descargada hasta reducirla a la ciudad de Montería, Departamento de Córdoba, Colombia, donde se encuentra el tramo de estudio (Figura 44).



*Figura 45. Nube de puntos formada a partir del MDE ALOS PALSAR, sobre la ciudad de Montería, Colombia.*

Una vez definida la zona de estudio, el modelo digital de elevación, que se encuentra en formato raster, se convierte a formato de punto. Se crea una nube de puntos densa interpolada a cada 5 metros, para obtener información (x, y, z) sobre toda la zona de estudio (Figura 45).

Posteriormente, se crea una superficie sobre el contorno del cauce, digitalizando el espejo del agua, para extraer la información sobre el río, producto del modelo digital de elevación, que integra la topografía del sitio; sin embargo, no tiene información detallada del relieve del fondo del cauce. Se eliminan los puntos, y se forma una nube de puntos, que contiene solamente información topográfica de la zona de urbana (Figura 46).



*Figura 46. Digitalización y extracción de puntos sobre la zona del cauce.*



*Figura 47. Unión de datos topográficos y batimétricos de la zona de estudio.*



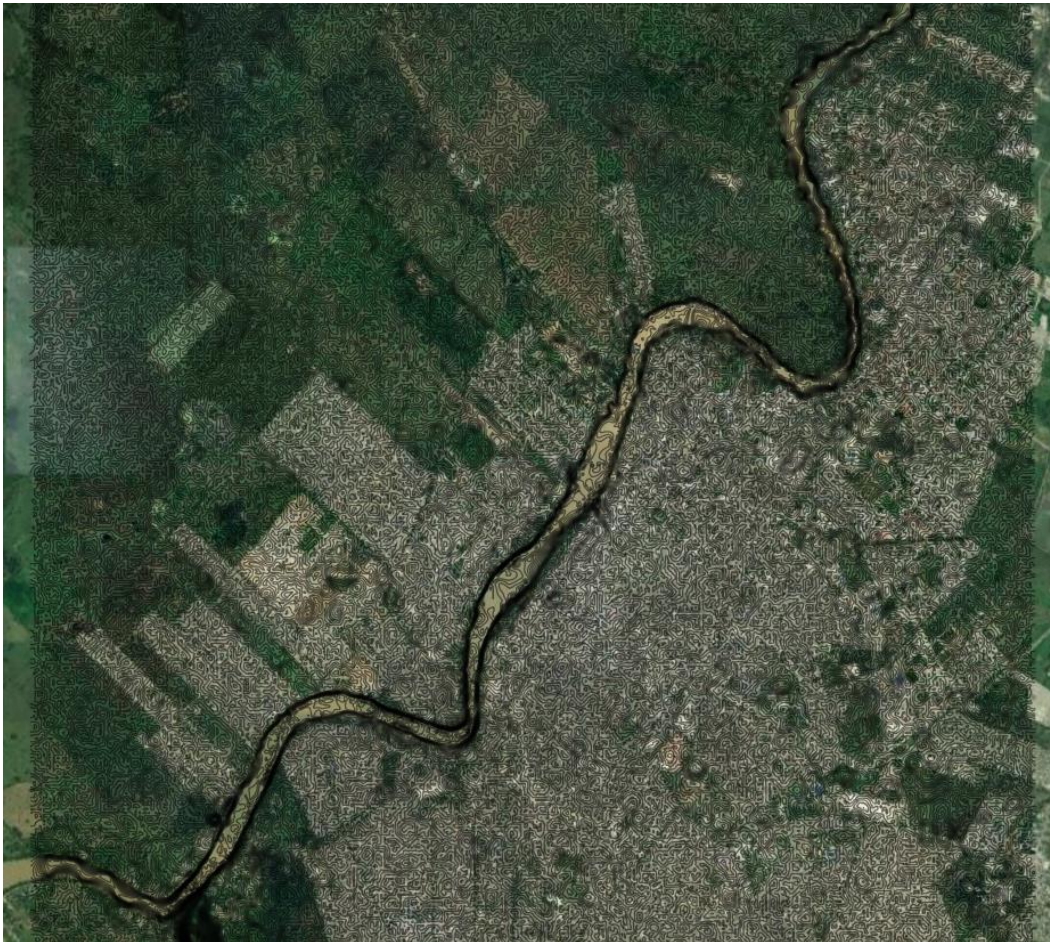
Para la creación de un MDE detallado, se realiza la unión de puntos generados en las campañas de medición, utilizando la información batimétrica del cauce. Se insertan los puntos, con información batimétrica del río, sobre la nube de puntos donde anteriormente se extrajeron los puntos topográficos sobre el cauce. Se obtiene una nube de puntos, que integra los registros de las campañas de medición, y la información topográfica de la zona urbana (Figura 47).

Se emplea la herramienta *Topo to Raster* en ArcGIS 10.5, que utiliza una técnica de interpolación de diferencia finita iterativa, para la creación de un modelo digital de elevación corregido, con resolución de 5 metros, a partir de los datos de topografía y batimetría asociados a la zona de estudio (Figura 48).



Figura 48. Modelo digital de elevación corregido, representa la topobatimetría de la zona de estudio.

Se generan curvas de nivel a cada 1 metro (Figura 49), utilizando el modelo digital de elevación corregido, permitiendo visualizar los márgenes del cauce, y representar el relieve del fondo del río Sinú, así como la zona urbana de Montería, Departamento de Córdoba, Colombia.



*Figura 49. Curvas de nivel a cada 1 metro sobre la zona urbana de Montería, Colombia.*

La metodología para el empalme e interpolación de datos topográficos y batimétricos, muestra un drenaje conectado y corregido, representa de manera adecuada las crestas y cauces visualizados en las visitas al sitio, y campañas de medición.

Las curvas de nivel de la zona urbana de Montería, Colombia, y las correspondientes al fondo del cauce, permiten observar una adecuada representación topobatimétrica de la zona de estudio.

### 4.3.3. Topobatimetría del río Sinú, tramo Montería

La topobatimetría del río Sinú, generada mediante la metodología de trabajo descrita anteriormente, sobre el tramo de Sierra Chiquita hasta la Universidad de Córdoba, y la zona urbana de Montería, Colombia, permite visualizar a definir a detalle el cauce, e identificar la zona urbana, representando una realidad acertada de la situación actual del río Sinú (Figura 50).

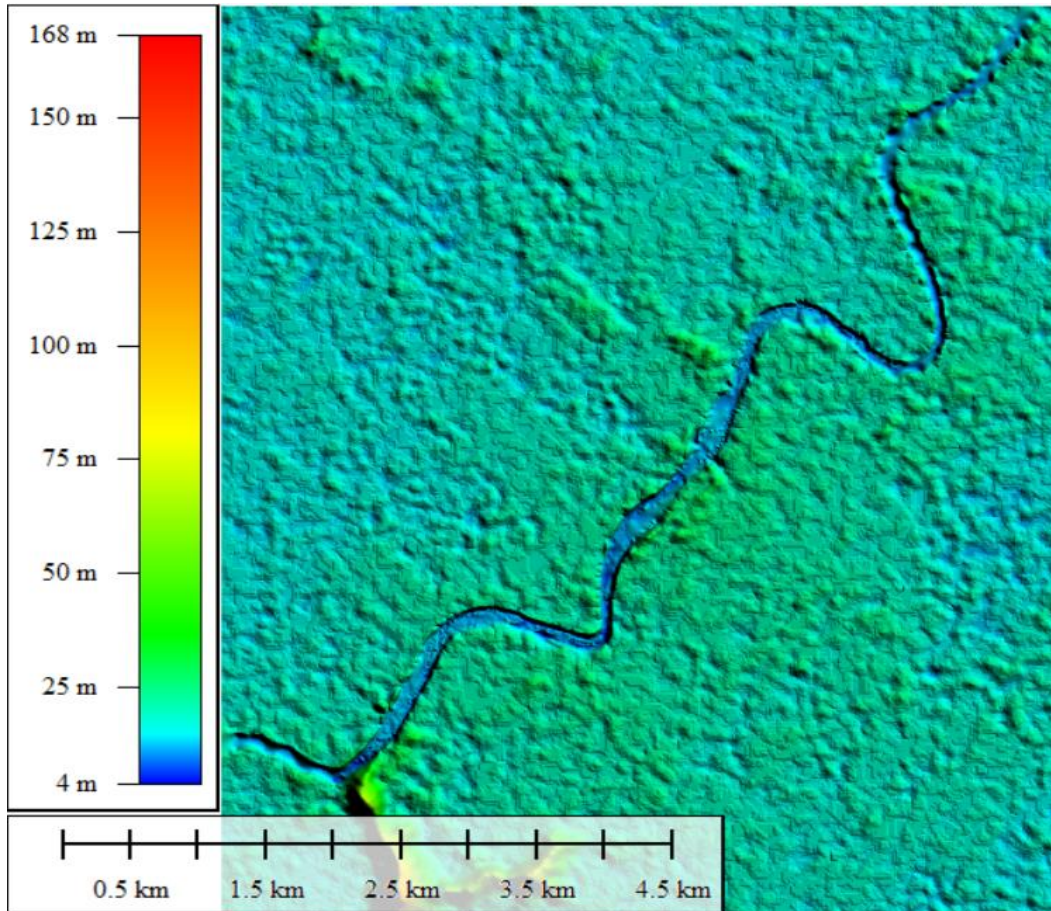


Figura 50. Topobatimetría de la zona de estudio.

El modelo digital de elevación que representa la topobatimetría de la zona de estudio, son datos de entrada para modelos numéricos hidrodinámicos, que son capaces de analizar el flujo del agua, permiten entender el comportamiento hidrodinámico del río, asociar puntos críticos de desbordamientos e identificar posibles zonas de inundación.

## **5. MODELACIÓN NUMÉRICA DEL RÍO SINÚ**

La gestión integral del agua junto a los avances en la investigación en recursos hídricos, así como las mejoras en la capacidad de cómputo, han permitido el desarrollo de múltiples herramientas de modelación para simular el comportamiento del flujo, la calidad del agua y la ecología. Una de las herramientas más importantes en este contexto, la constituye la modelación de la dinámica del agua (MADS, 2018).

La modelación es empleada como un medio para evaluar, y planificar acciones para hacer frente a los problemas actuales, asociados al agua. Las capacidades técnicas de los modelos, varían mucho entre los diferentes temas relacionados con el recurso hídrico, aumentando la exactitud y la eficacia de la información que se genera para los administradores, tomadores de decisiones y científicos (IDEAM, 2018).

Todo ejercicio de modelación de un sistema natural, consiste en una representación de los procesos que ocurren en realidad en la naturaleza, mediante herramientas numéricas o físicas, lo cual implica una serie de limitaciones intrínsecas al proceso de modelación, que pueden condicionar la aplicabilidad de los resultados, teniendo en cuenta que, la cantidad de procesos que intervienen, introducen un grado de complejidad que no es posible representar de forma precisa en un modelo matemático (MADS, 2018).

Si bien los modelos son simplificaciones de la realidad, su uso es cada vez más extendido, gracias a las bondades que ésta ofrece cuando se lleva a cabo de la manera apropiada, se hace una adecuada lectura de los resultados por parte de los tomadores de decisiones; es decir, es una herramienta potente cuando se realiza de manera rigurosa, y cuando existe una adecuada comunicación de los resultados entre los modeladores y los administración en sus diferentes niveles (IDEAM, 2018).

### **5.1. Ecuaciones gobernantes**

Las ecuaciones que gobiernan el movimiento de un fluido incomprensible están dadas por las ecuaciones de Navier-Stokes, que son una forma adaptada a la relación de la dinámica de los fluidos. El establecer estas ecuaciones requirió de

casi dos siglos, entre la publicación del trabajo de Newton en 1687 y la formulación de las ecuaciones fundamentales de la hidrodinámica por Sir Gabriel Stokes (1819 - 1903) y Claude-Louis Navier (1785 - 1836). El conjunto de ecuaciones diferenciales no lineales en tres dimensionales, que integran las ecuaciones de Navier-Stokes, no cuenta con una solución analítica o exacta, sin embargo, a partir del uso de aproximaciones numéricas, se ha logrado obtener soluciones de las ecuaciones para casos concretos (Hervouet, 2007).

Las ecuaciones de Navier-Stokes están dadas por (Broomans *et al.*, 2003):

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \nabla^2 u + f_x \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \nabla^2 v - f_y \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \nabla^2 w - f_z - \frac{\rho}{\rho_0} g \end{aligned} \quad (5.1)$$

En donde  $u$ ,  $v$  y  $w$  corresponden a las componentes de velocidad en las direcciones  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , respectivamente,  $\rho$  es la densidad,  $\rho_0$  la densidad de referencia,  $p$  la presión,  $\nu$  es la viscosidad cinemática y  $f_x$ ,  $f_y$  son las componentes de fuerza de Coriolis por unidad de masa. Estas están definidas por  $(f_x, f_y)^T = -2\underline{\Omega} \times (u, v, w)^T$ , donde  $\underline{\Omega}$  es el vector de rotación de la tierra. Las ecuaciones de Navier-Stokes (5.1) son válidas bajo la hipótesis que la densidad es constante o si la aproximación de Boussinesq aplica.

**Hipótesis 1 (Aproximación de Boussinesq).** “La aproximación de Boussinesq establece que si la variación de la densidad es pequeña, la densidad puede ser tomada como constante en todos los términos, excepto en el término gravitacional” (Broomans *et al.*, 2003).

Debido a los remolinos turbulentos, pequeñas variaciones ocurren en las velocidades de flujo y en la presión. Estas variaciones son muy pequeñas para ser representadas en un esquema numérico, a menos que el mallado sea fino. Para

enfrentarnos a este fenómeno, se descomponen las velocidades y la presión como lo siguiente:

$$u = \bar{u} + u', \quad v = \bar{v} + v', \quad w = \bar{w} + w', \quad p = \bar{p} + p', \quad (5.2)$$

Donde la barra, representa las cantidades promediadas en el tiempo. Entonces  $\bar{u}$  se define como:

$$\bar{u}(t) = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} u(\tau) d\tau$$

El periodo T debe ser más largo que la escala de tiempo de la turbulencia, pero más pequeña que los periodos largos, tales como las mareas. Las fluctuaciones de la turbulencia están dadas por  $u'$ ,  $v'$ ,  $w'$  y  $p'$ . Donde los promedios de las fluctuaciones valen cero, es decir,  $\frac{1}{T} \int_t^{t+T} u' d\tau = 0$ .

Al sustituir las ecuaciones (5.2) en la (5.1), y promediando los resultados respecto al tiempo, surgen las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds o ecuaciones de Reynolds, para flujo turbulento (Broomans *et al.*, 2003).

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \frac{\partial \overline{u'u'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} - \bar{f}_x \quad (5.3a)$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} + \frac{\partial \overline{v'u'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} - \bar{f}_y \quad (5.4b)$$

$$\frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} + \frac{\partial \overline{w'u'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{w'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{w'w'}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} - \bar{f}_z - \frac{\rho}{\rho_0} g \quad (5.5c)$$

Las correlaciones entre las componentes fluctuantes de velocidad ( $\overline{u'u'}$ ,  $\overline{u'v'}$ , *etc.*) son desconocidas. Estas correlaciones son responsables de la pérdida de momentum en la dirección media del flujo y, por lo tanto, aparecen para actuar como esfuerzo en el fluido. A estos se les conoce como esfuerzos de Reynolds. Los

esfuerzos viscosos son mucho menores a los esfuerzos de Reynolds, por lo que, los esfuerzos viscosos pueden ser despreciados.

**Hipótesis 2 (concepto de viscosidad de remolino o hipótesis de Boussinesq).**

“Los esfuerzos de Reynolds como los esfuerzos viscosos dependen de la deformación del flujo medio”. Estos esfuerzos son modelados como (Broomans *et al.*, 2003):

$$\overline{u'v'} = -\nu_t \left( \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) \tag{5.4}$$

Donde  $\nu_t$  es la viscosidad de Eddy. Esta viscosidad es a priori desconocida y sugiere una expresión apropiada para ser construida.

Las ecuaciones de aguas someras en tres dimensiones son llamadas Shallow Water Equations o ecuaciones de Saint Venant, sólo cuando el flujo satisface ciertas relaciones.

**Hipótesis 3 (presión hidrostática).** “La presión es hidrostática en la dirección vertical. Esta hipótesis admite flujos caracterizados por órdenes de magnitud mayores en longitud de escala horizontal que ordenes en longitud de escala vertical” (Broomans *et al.*, 2003).

Esta suposición permite que los términos  $\frac{\partial \bar{w}}{\partial x}$  y  $\frac{\partial \bar{w}}{\partial y}$  sean despreciados. La diferencia entre la longitud de escala horizontal y vertical, justifica una distinción entre la viscosidad turbulenta horizontal  $\nu_t^H$  y vertical  $\nu_t^V$ . La ecuación de momentum (5.3c) en la dirección vertical, se reduce a una distribución en la presión hidrostática.

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} = -\rho g \tag{5.5}$$

Integrando la ecuación (5.5), resulta en:

$$\bar{p}(x, y, z, t) = g \int_z^{\zeta} \rho dz + p_a \tag{5.6}$$

Donde  $\eta = \eta(x, y, t)$  es el nivel de superficie libre contra un plano de referencia  $z = 0$  y  $p_a$  es la presión atmosférica. Sustituyendo este resultado en el término de presión de la ecuación (5.3a) y usando la regla de integración de Leibniz, resulta:

$$-\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} = -\frac{\rho g}{\rho_0} \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\zeta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz' - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x}$$

El primer término, en el lado derecho, representa el gradiente de presión horizontal que se describe por diferencias del nivel de agua a través del término barotrópico, mientras que, el segundo término se describe por diferencias de densidad en dirección horizontal a través del término baroclínico. El último término, en el lado derecho, describe la contribución de la presión atmosférica. Si se considera  $\rho$  constante, la ecuación (5.6) puede leerse como  $\bar{p} = \rho g(\zeta - z) + p_a$  y para el término de presión de la ecuación (5.3a) se tendría:

$$-\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x}$$

Si se desprecia el gradiente de presión atmosférica, el gradiente de presión horizontal se reduce al término barotrópico.

Cuando sustituimos las ecuaciones (5.4) y (5.6) en las ecuaciones (5.3a) y (5.3b), tomando la densidad constante, despreciando el gradiente de presión atmosférica, se obtiene:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \\ = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + f_v + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left( v_t^H \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( v_t^H \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_t^V \frac{\partial u}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (5.7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \\ = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - f_u + \frac{\partial}{\partial x} \left( v_t^H \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) + 2 \frac{\partial}{\partial y} \left( v_t^H \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_t^V \frac{\partial v}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (5.8)$$

Cuando  $f$ , el parámetro de Coriolis, es definido por:

$$f = 2\Omega \sin(\phi)$$



Donde  $\Omega$  es la velocidad angular de la tierra y  $\phi$  la altitud. Las ecuaciones (5.7), (5.8) y la ecuación de continuidad en su forma incompresible:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (5.9)$$

Se les conoce como Shadow Water Equations. Estas ecuaciones representan un sistema de tres ecuaciones, con tres funciones desconocidas de velocidad  $u(x, y, z, t)$ ,  $v(x, y, z, t)$ ,  $w(x, y, z, t)$  y la superficie libre  $\zeta(x, y, t)$ , que también se desconoce. Entonces, se requiere una cuarta ecuación para resolver las variables desconocidas.

Para lo anterior, se integra la ecuación de continuidad (5.9) a lo largo del eje vertical, que resulta:

$$w(x, y, \zeta, t) - w(x, y, d, t) = - \int_{-d}^{\zeta} \frac{\partial u}{\partial x} dz - \int_{-d}^{\zeta} \frac{\partial v}{\partial y} dz \quad (5.10)$$

Donde  $d = d(x, y)$  es la profundidad del agua debajo del plano de referencia  $z = 0$ . Los cambios morfológicos del fondo debido al flujo del agua son en general pequeños y, por lo tanto, pueden ser despreciados. Así mismo,  $d$  no depende del tiempo. La ecuación (5.10) puede sobrescribirse si se usan sustituciones para  $w$  en el fondo y en la superficie del agua. Para  $z = \zeta(x, y, t)$  se tiene:

$$w = \frac{\partial \zeta}{\partial t} = \frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y} \quad (5.11)$$

Una expresión similar, para el fondo resulta en:

$$w = -u \frac{\partial d}{\partial x} - v \frac{\partial d}{\partial y} \quad (5.12)$$

Sustituyendo las ecuaciones (5.11) y (5.12) en la ecuación (5.10) y usando las reglas de integración de Leibnitz, se tiene:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \int_{-d}^{\zeta} u \, dz - \frac{\partial}{\partial y} \int_{-d}^{\zeta} v \, dz \quad (5.13)$$

Si se define la velocidad promedio para determinada profundidad,  $U$  y  $V$  por  $U := \frac{1}{H} \int_{-d}^{\zeta} u \, dz$  y  $V := \frac{1}{H} \int_{-d}^{\zeta} v \, dz$ , donde  $H = H(x, y, t) = \zeta + d$  es la profundidad del agua, la ecuación (5.13) resulta:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial HU}{\partial x} + \frac{\partial HV}{\partial y} = 0 \quad (5.14)$$

Las ecuaciones gobernantes de flujo a superficie libre, al no tener una solución exacta, se realizan métodos de aproximación para conocer el comportamiento real de los fluidos (Broomans *et al.*, 2003).

En general, existen tres tipos de métodos para resolver el sistema de ecuaciones de Navier-Stokes para flujo incompresible: los métodos basados en la ecuación de vorticidad, donde se aplica la divergencia a la ecuación de Navier-Stokes, de forma que el vector de vorticidad se convierte en la nueva incógnita; métodos basados en compresibilidad artificial, adoptados de los métodos disponibles para flujo compresible, facilitando la imposición de condiciones de contorno; y métodos de iteración que resuelven el campo de presiones o aquellos de tipo predicción-corrección como son el *Fractional Step Method (FSM)*, el *Semi-Implicit Method for Pressure-Linked-Equations (SIMPLE)* y sus modificaciones, entre otros (Lizeth *et al.*, 2013).

Los métodos de discretización para resolver las ecuaciones de Navier-Stokes, a través del método de volúmenes finitos, presenta un amplio uso en la dinámica de fluidos computacional (CFD, acrónimo en inglés), debido a que mantiene la conservación de las variables discretizadas, inclusive en mallas no estructuradas para geometrías complejas. Sin embargo, también se utilizan métodos de elementos finitos (MEF), con mayor aplicabilidad en dinámica de sólidos, que han tenido aplicaciones en CFD, hasta emplearse para el diseño aerodinámico y el aeroespacial. Los costos computacionales en la resolución de ecuaciones

dependientes del tiempo, resultan en la elección de un método iterativo por encima de un método directo, sobre todo en ecuaciones de 3D, por la capacidad computacional y de memoria que se requiere para su solución (Lizeth *et al.*, 2013).

## 5.2. Tipos de modelos numéricos

Existen diferentes clasificaciones de los modelos numéricos, en función del tiempo, las problemáticas y soluciones requeridas, involucrando diferentes grados de complejidad, los cuales se describen a continuación (IDEAM, 2018):

Desde el punto de vista temporal, se tienen los siguientes modelos:

- Modelos de eventos: la duración puede variar de horas a pocos días, y hacen referencia básicamente a modelación hidrológicos de aguaceros.
- Modelos continuos: concebidos para modelar periodos largos (meses, años). Son bastante útiles en un contexto de gestión del recurso hídrico.



Figura 51. Escala temporal de la modelación dinámica del agua. (Fuente: IDEAM, 2018).

Algunos ejemplos de las resoluciones temporales, y las características de la modelación de la dinámica del agua, asociada con la problemática y resultados que se buscan, se presentan en la Figura 51.

Existen modelos con diferentes grados de complejidad, algunos de ellos, no son más que simplificaciones del ciclo hidrológico; a continuación, se presenta otra clasificación de acuerdo con (IDEAM, 2018):

- Modelos empíricos: son los que recurren a fórmulas, lineales o no, para relacionar una o más variables independientes con la o las variables dependientes que se quieren simular.
- Modelos conceptuales: son los que, a través fórmulas y algoritmos, representan los procesos físicos que se producen en la naturaleza, desde el momento en que se inicia la precipitación sobre la cuenca hidrográfica de estudio.
- Modelos estocásticos: en los cuales está involucrada la componente aleatoria del fenómeno bajo un determinado enfoque.
- Modelos deterministas: hacen referencia a aquellos que tienen una única salida.
- Modelos físicamente basados: utilizan el principio de conservación de masas, momento y ecuaciones de energía que representan en forma detallada los procesos hidrológicos.

Otra clasificación de los modelos, según el problema que pretenden resolver, se presentan como:

- Modelos de simulación, predicción, optimización (según la técnica empleada), descriptivos o de identificación.

Según las ecuaciones matemáticas que resuelven los modelos, se clasifican como:

- Modelos de ecuaciones diferenciales ordinarias, derivadas parciales, estadísticos, entre otros.

### **5.3. Proceso de la modelación numérica**

El proceso de modelación puede entenderse como la interacción de cuatro elementos básicos: realidad, modelo conceptual, código y modelo. Dichos elementos, están vinculados entre sí, a través de los procesos de análisis,

programación, preparación del modelo y simulación, que a su vez, comprenden procedimientos que evalúan la fiabilidad de dichos procesos, como la confirmación, verificación, calibración y validación (MADS, 2018). Los elementos, procesos y procedimientos que intervienen en la modelación, se muestran en la Figura 52.

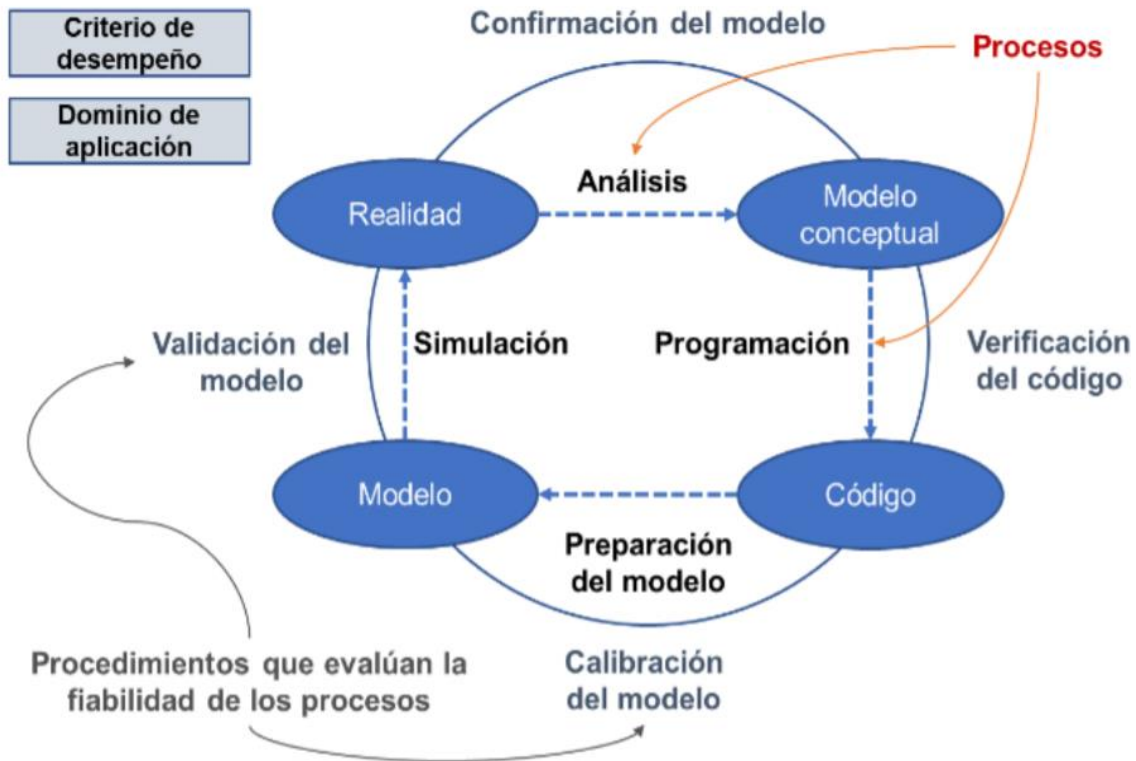


Figura 52. Elementos que intervienen en la modelación. (Fuente: MADS, 2018)

La descripción de las etapas en las que se desarrolla el proceso de modelación consiste en la representación de la realidad, mediante un modelo conceptual, el cual implica una serie de simplificaciones e hipótesis, que permiten describir de forma aceptable el sistema natural a representar. Este modelo conceptual, es posteriormente trasladado a un código computacional, con el fin de realizar las simulaciones y cálculos con ayuda de un computador. Posteriormente, el código computacional construido es configurado para que represente las condiciones particulares del área de estudio (por ejemplo, caudales, vertimientos, etc.), con lo cual se obtiene el modelo de un caso de estudio particular. Finalmente, el modelo implementado debe ser calibrado y validado, con el fin de garantizar su capacidad

de representar las condiciones observadas en la realidad, de forma que pueda ser usado para la simulación de distintos escenarios (MADS, 2018).

De acuerdo con el Guía Nacional del Recurso Hídrico para Aguas Superficiales del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia (2018), se presentan las definiciones generales de cada uno de los componentes, procesos y procedimientos de una modelación:

**Realidad.** Se refiere al sistema natural, entendido como el área de estudio, que hace referencia a todos los procesos naturales, que interactúan y tienen incidencia sobre el comportamiento del flujo. La realidad queda caracterizada por aquellas magnitudes macroscópica, cuya medición es inmediata (niveles, velocidades medias, etc.) y, por lo tanto, supondrá siempre una simplificación de la realidad subyacente, cuya complejidad la hace incognoscible a nivel de detalle.

**Modelo conceptual.** Un modelo conceptual es una descripción de la realidad, a través de abstracciones, ecuaciones, relaciones constitutivas o leyes naturales. Se trata de una representación de los procesos físicos, químicos y biológicos, predominantes en el área de estudio, en conjunto con las simplificaciones y los límites que se suponen como aceptables, con el fin de alcanzar los objetivos de la modelación. El modelo conceptual es el resultado de un análisis detallado de los procesos que ocurren en la realidad.

**Código del modelo.** Es una herramienta genérica, que puede ser usada para establecer modelos aplicables a diferentes casos de estudio, aplicando las mismas ecuaciones, variando únicamente los datos de entrada y los valores de los parámetros. El proceso mediante el cual un modelo conceptual es plasmado en un código, se conoce como programación.

**Modelo.** Un modelo es la representación aproximada de las condiciones asociadas a un área de estudio en particular. El modelo incluye, los datos de entrada y los valores de sus parámetros, los cuales son específicos para el sitio de estudio. En otras palabras, un modelo consiste en la aplicación de un código genérico a las condiciones particulares de un caso de estudio específico; este proceso se denomina configuración o preparación del modelo.

**Confirmación del modelo.** Es el proceso mediante el cual, se verifica que un modelo conceptual representa de forma adecuada la realidad observada. Se trata de la confirmación científica de las hipótesis y teorías incluidas en el modelo conceptual.

**Verificación del código.** Es el proceso mediante el cual, se comprueba que un determinado código, representa adecuadamente el modelo conceptual planteado para un sistema en particular. La verificación de un modelo, se lleva a cabo mediante la simulación de casos particulares, que permitan evaluar su respuesta ante series de entrada con resultados conocidos.

**Calibración del modelo.** Es el procedimiento mediante el cual, se ajustan los valores de los parámetros de un modelo, con el fin de reproducir de forma tan acertada como sea posible las características observadas en la realidad, de acuerdo con el nivel aceptabilidad establecido en los criterios de desempeño.

**Validación del modelo.** Una vez un modelo ha sido calibrado, se debe comprobar su capacidad de predecir los resultados observados en la realidad, usando los valores de los parámetros definidos durante el proceso de calibración y series de entrada independientes de las usadas en dicho proceso. La validación consiste en la comprobación de que un modelo presenta un rango satisfactorio de exactitud dentro de su dominio de aplicación, consistente con el objetivo establecido para la aplicación del modelo.

**Simulación.** Corresponde al uso de un modelo validado para obtener conocimiento sobre el sistema natural, analizando su respuesta ante intervenciones humanas y generar predicciones que puedan ser utilizadas por los tomadores de decisiones.

#### **5.4. Modelos numéricos para el análisis hidráulico**

Los modelos numéricos relacionados con el análisis hidráulico, buscan reproducir un fenómeno natural o realidad que, para el caso de interés, se enfoca en determinar el movimiento o dinámica del agua, utilizando modelos físicos y/o matemáticos. En este tipo de modelaciones, se busca una simplificación de un

fenómeno natural, caracterizando la particularidad del flujo, para lo cual, se utilizan como referencia las dimensiones o direcciones características, que describen el movimiento del agua en el sistema de interés (IDEAM, 2018).

Los modelos numéricos pueden ser unidimensional, bidimensionales o tridimensionales dependiendo de las características físicas del medio a simular, tal como se describe a continuación (Castillo & Espinoza, 2005):

- Modelos unidimensionales: se utilizan para representar el flujo del agua en ríos, siendo la dirección considerada el sentido del escurrimiento.
- Modelos bidimensionales: se utilizan para ríos de gran ancho, en los cuales las concentraciones de contaminantes o comportamiento del flujo varían de un lado de la ribera al otro. En estos casos, se usa un sistema cartesiano de coordenadas, en el cual una de ellas corresponde al sentido del flujo y la otra a la dimensión lateral.
- Modelos tridimensionales: encuentran aplicación en estudios de agua subterráneas, y en sistemas más complejos de aguas superficiales. Se requiere de información adicional, que los modelos unidimensionales y bidimensionales, así como un mayor tiempo computacional, por lo que su uso se restringe a problemas de gran magnitud, cuando se dispone de recursos suficientes para su aplicación.

La implementación de un modelo hidrodinámico es cada vez más compleja, a medida que se incrementa el número de dimensiones, características del flujo a tener en cuenta, lo cual impacta en el requerimiento de cantidad de información, recursos computacionales y, en el incremento en los tiempos de ejecución o computo, necesarios para su buen desarrollo, lo que indica que, modelaciones de sistemas complejos en una dimensión, pueden tardar del orden de minutos en su ejecución, mientras que, para el caso de modelaciones bidimensionales, pueden tardar del orden de horas o días y, para el caso tridimensional, días o semanas (IDEAM, 2018).

En general, los modelos numéricos para los análisis hidráulicos, buscan desarrollar soluciones eficientes a las ecuaciones de Saint Venant, que describen el



comportamiento del flujo basados en términos de principios de continuidad (balance de masa) e impulso (balance de energía, donde se tiene en cuenta la segunda ley de Newton), teniendo en cuenta algunas suposiciones y simplificaciones que permiten su aplicación en diversas áreas de la ingeniería (IDEAM, 2018).

## 5.5. Softwares para modelación numérica de flujo

Existe una gran variedad de modelos hidráulicos disponibles, muchos de ellos desarrollados desde diversos esquemas, desarrollos y simplificaciones matemáticas, donde los más comúnmente utilizados son de volumen y diferencias finitas. A continuación, la Tabla 29 muestra el software desarrollados por entidades comerciales y académicas para simulación de cauces (Ceballos-López, 2011):

Tabla 29. Softwares utilizados para la modelación numérica, libres y comerciales.

Modelo	Capacidades	Tipo de modelo
<b>Hec Ras</b>	Simula saltos hidráulicos, puentes, alcantarillas, desviaciones, etc. Considera análisis de planicies de inundación.	Unidimensional
<b>Isis 2.5</b>	Análisis morfológico de canales y problemas de sedimentación de ríos y, principalmente, canales de irrigación. Simula procesos de erosión.	Unidimensional
<b>Iber 2.4</b>	El cálculo de flujo en ríos, definición de zonas inundables, evaluación de zonas de riesgo, y delimitación de vías de intenso desagüe	Bidimensional
<b>SMS 9.2</b>	Simula procesos de erosión, procesos a largo plazo (tendencias evolutivas). Considera formas del lecho: saltos, pozos, cascadas	Bidimensional
<b>SSIIM 2.0</b>	Simula transporte de sedimentos en lecho móvil para geometrías complejas de canales y distintos tamaños del sedimento, además de la carga de fondo y en suspensión, cambios en la elevación del lecho, gradación hidráulica.	Tridimensionales
<b>EFDC Explorer</b>	Análisis flujo hidrodinámico, calidad del agua, integrado con módulos para salinidad, temperatura, sedimentos y transporte de contaminantes, entre otros.	Tridimensionales

## 5.6. Protocolo para la selección del modelo numérico

De acuerdo con el protocolo propuesto la Guía Nacional del Recurso Hídrico para Aguas Superficiales del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia (2018), para la selección del modelo, se propone aplicar un método simple, que consiste en calificar en una escala cualitativa o cuantitativa los criterios expuestos a continuación:

1. **Características del modelo:** En este grupo se deben considerar aspectos definidos anteriormente, tales como:
  - a. Procesos y parámetros: se evalúa el hecho de que el modelo simule los procesos, y parámetros seleccionados para ser modelados.
  - b. Escala espacial: se evalúa la capacidad o robustez que tiene el modelo para representar las dimensiones x, y, z, es decir, los modelos de 1, 2 o 3 dimensiones.
  - c. Escala temporal: se evalúa el modelo en su capacidad de representar el cambio de caudal en el tiempo.
2. **Requerimientos en datos de entrada:** Está relacionado directamente con la complejidad del modelo, pues a mayor complejidad del modelo, se requerirá mayor volumen de datos, y mayor capacidad técnica del personal.
  - a. Personal: modelos complejos requieren personal altamente calificado.
  - b. Datos de entrada: se evalúa el requerimiento de información adicional a la existente necesaria para ejecutar un modelo de simulación.
3. **Aplicaciones previas en el ámbito local:** se considera un parámetro de evaluación, toda vez que, entre más experiencias y aplicaciones en el entorno local, se dispondrá de una mejor fuente de información.
4. **Flexibilidad:** la cual se entiende como la capacidad de modelar los procesos y la facilidad de modificar el código fuente para ajustarlo a aplicaciones específicas.
5. **Documentación:** la disponibilidad de información como manuales y/o tutoriales, y el hecho de que se encuentren en idioma español se considera una ventaja.

6. **Actualización:** modelos que tienen soporte y son continuamente actualizados se consideran adecuados toda vez que esto implica una revisión constante del estado del arte y su inclusión en el modelo.

El proceso de selección del modelo numérico resultó en el uso y aplicación del modelo EFDC Explorer para el desarrollo del modelo hidrodinámico de flujo sobre el río Sinú para el análisis de inundaciones, debido a las características del modelo, sus alcances y funciones, datos de entrada, así como aplicaciones previas del modelo EFDC sobre la zona de estudio y cuerpos de agua, permiten alcanzar los objetivos del proyecto.

### **5.7. Environmental Fluid Dynamics Code (EFDC Explorer)**

El Environmental Fluid Dynamics Code fue desarrollado por el *Virginia Institute of Marine Science (VIMS)* y la *School of Marine Science of The College of William and Mary*, por el Dr. John M. Hamrick a partir de 1988, posteriormente patrocinado por la *U.S. Environmental Protection Agency and the National Oceanic and Atmospheric Administration's Sea Grant Program* (Tetra Tech, 2007).

El modelo EFDC Explorer es un pre/post procesador, basado en Microsoft Windows, usado para la modelación de aguas superficiales, que incluye la hidrodinámica, sedimentos, contaminantes y módulos de calidad del agua integrados en el código fuente. Este modelo se ha aplicado a más de 100 cuerpos de agua, incluidos ríos, lagos, embalses, humedales, estuarios y zonas oceánicas, para la evaluación, gestión y análisis de requerimientos regulatorios (Craig & Solutions-international, 2012)

El EFDC Explorer fue desarrollado mediante una estructura caracterizada por un modelo construido con celdas de elementos finitos, que es posible humedecer y secar en el procesado del contorno, permite el intercambio de calor con la atmosfera, simular la calidad del agua y la hidrodinámica tridimensional de los cuerpos de agua, así como simular gran variedad de problemas ambientales, hidráulicos y de transporte (Torres-bejarano *et al.*, 2015).

El modelo EFDC resuelve las ecuaciones de movimiento en superficie libre o *Shallow Water Equations*, las ecuaciones promediadas de turbulencia para un fluido de densidad variable, así como las ecuaciones de transporte dinámicamente acopladas para la energía turbulenta cinemática, longitud de escala de turbulencia, salinidad y temperatura. Este modelo utiliza coordenadas cartesianas y curvilíneas ortogonales para el plano horizontal, y un sistema de coordenadas tipo sigma para el plano vertical (Hamrick, 1996).

### **5.8. Implementación del modelo EFDC Explorer**

El proceso la implementación o preparación del modelo, sugiere una simplificación de las condiciones presentes sobre el tramo de estudio, incluyendo información correspondiente a las condiciones iniciales, datos de entrada, condiciones de frontera, entre otros. Se consideran aspectos hidrológicos, hidráulicos, topográficos, ambientales de la zona de estudio, analizados en capítulos anteriores, dentro de este trabajo de investigación.

El modelo EFDC Explorer tiene una interfaz amigable que permite crear una malla, modificar las condiciones iniciales, agregar información topográfica, definir el nivel de aguas superficiales, modificar valores como el coeficiente de Manning, establecer condiciones de frontera, modificar los tiempos de cálculo, y simular diferentes escenarios, en función de los objetivos de cada proyecto.

El presente proyecto busca crear un modelo hidrodinámico, para identificar zonas de inundación, ante diferentes escenarios climáticos sobre el río Sinú, tramo Montería, Colombia. Se desarrolla este modelo utilizando el software EFDC Explorer, que realiza un preproceso, buscando acercar el modelo con la realidad de la zona de estudio, y un postproceso, que permite analizar el comportamiento del río Sinú y visualizar resultados de las simulaciones en el modelo.

El proceso para integrar y crear el modelo inicia con la creación de la malla, formada por celdas, que comprenden el dominio de estudio, donde se asignan ciertas características del sitio.

### 5.8.1. Discretización del dominio

La creación de la malla requirió de un análisis de las resoluciones del tamaño de las celdas, probando diferentes mallas que permitiera un tiempo de procesamiento aceptable, considerando el equipo de cómputo disponible, y el área o dominio de la malla para cubrir la totalidad de la zona de estudio.

Para este modelo, se utiliza el programa CVLGrid, generando mallas curvilíneas complejas en 2D, aplicable a modelos hidrodinámicos. En este programa, se realiza un proceso intuitivo y veloz para la creación de la malla, aplicable a cualquier superficie o cuerpo de agua, permitiendo su uso en el modelo EFDC Explorer.

Para la creación de la malla sobre el río Sinú y la zona urbana de Montería, se establecieron los límites de la zona de estudio en el sistema de referencia WGS84 UTM Zona 18 Norte, formando un polígono irregular para delimitar el dominio del modelo (Figura 53).

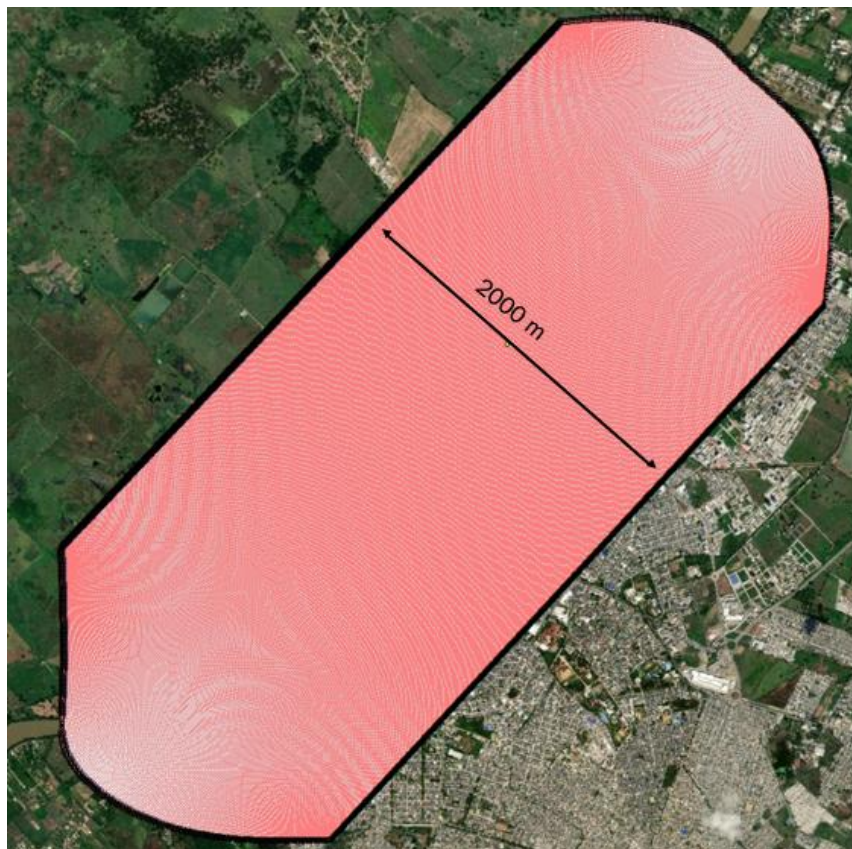


Figura 53. Malla de modelo hidrodinámico del río Sinú.

La malla generada tiene la opción de refinarse, de acuerdo con las necesidades del proyecto, sin embargo, el río Sinú al ser un cauce de 150 – 180 metros de ancho, se busca que las celdas sean inferiores a este ancho, y se ajusten dentro del cauce del río.



Figura 54. Malla del modelo sobre el cauce y zona urbana.

La malla curvilínea utilizada para la discretización del dominio se exporta de CVLGrid al modelo EFDC Explorer, conservando un ancho de 2000 metros, ajustándose al ancho del río Sinú y zona urbana de Montería (Figura 54). Las celdas tienen un tamaño promedio de  $\Delta X= 6.5$  metros,  $\Delta Y= 16$  metros, con 200,000 elementos activos.

### 5.8.2. Condiciones iniciales

Se considera una condición inicial al valor de una variable en todo el dominio espacial, en el momento inicial de la simulación, es decir, en un tiempo igual a cero. El modelo EFDC Explorer está constituido por sistemas de ecuaciones diferenciales parciales. Cuando se simula la evolución en el tiempo de una variable, se definen los valores de dicha variable en el tiempo inicial de simulación, en todo el dominio espacial del modelo.

Para establecer las condiciones iniciales sobre el río Sinú, se definió la elevación de la lámina del agua sobre el cauce, la rugosidad de la superficie, datos de altimetría de la zona de estudio, estos permiten representar la realidad del modelo al iniciar la simulación.

En la pestaña *Domain*, dentro del apartado *Inicial Conditions*, se modifican aspectos como la batimetría, la elevación de la superficie del agua y la rugosidad, asignando valores mediante la creación de polígonos y la importación de datos altimétricos de la zona (Figura 55).

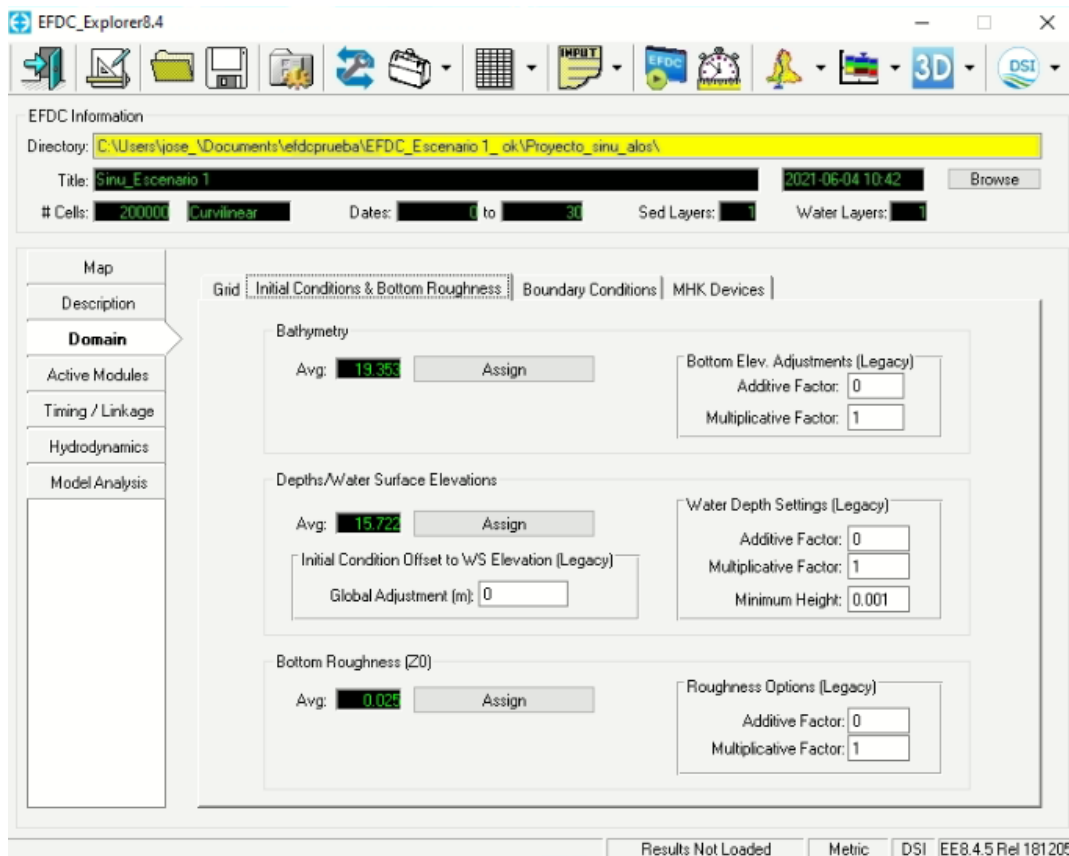


Figura 55. Interfaz del EFDC Explorer para asignar condiciones iniciales.

La batimetría fue añadida al asignar valor a la malla con la información topobatemétrica del río Sinú, generada y descrita en el *Capítulo 4* de este documento. A cada celda de la malla, se le asignó una elevación de superficie, en función de los datos de topografía y batimetría asociados a la zona de estudio (Figura 56).

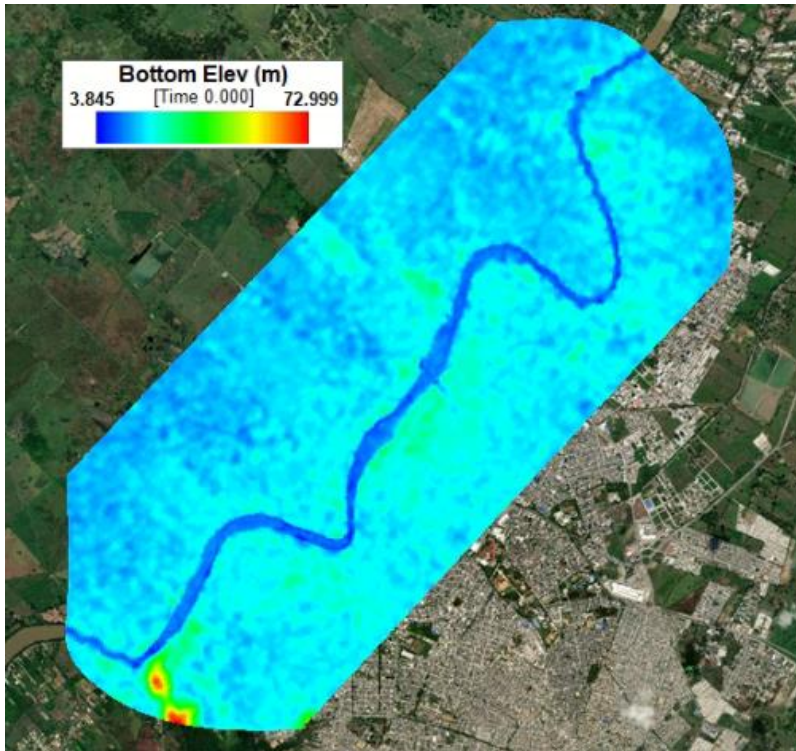


Figura 56. Topobatemetría asignada a la malla del modelo EFDC Explorer.



Figura 57. Condiciones iniciales de la superficie del agua sobre el río Sinú.



La elevación de la superficie del agua se definió al analizar los valores de la lámina de agua, registrados el día que se realizaron las campañas de medición batimétricas. Se asigna un valor constante de 16 m.s.n.m. sobre el cauce del río como condición inicial, correspondiente a la elevación de la superficie de agua sobre el cauce (Figura 57).

En relación con la rugosidad del modelo, esta representa las irregularidades de la superficie, definidas en función de las características del suelo, su permeabilidad y la facilidad para que fluya el agua. Para asignar el valor de la rugosidad, se tomaron valores definidos por (Chow *et al.*, 1994) para diferentes usos de suelo (Tabla 30).

Tabla 30. Valores de rugosidad asignados sobre el modelo.

Uso de suelo	Valores de rugosidad
Vegetación densa	0.045
Río	0.025
Zona urbana	0.011
Pastos	0.025
Cultivos	0.03

Los valores de rugosidad sobre la zona de estudio, asignados al modelo EFDC, se muestran en la Figura 58.



Figura 58. Rugosidad asignada al modelo EFDC Explorer.

### 5.8.3. Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera implementadas sobre el modelo EFDC, conectan al sistema natural a modelar con su entorno, y están asociadas con las variables de entrada. Se asignan las condiciones de frontera, de acuerdo con el valor que adquiere la variable (condición de frontera tipo Dirichlet) o a cómo cambia dicha variable con respecto al espacio (condición de frontera tipo Neumann).

Una de las condiciones frontera son el hidrograma de entrada, asociado con diferentes escenarios para periodos de retorno definidos en el *Capítulo 3*, donde se estiman los caudales máximos e hidrogramas para el análisis de inundaciones. El tipo de condición frontera en el modelo EFDC, para ingresar caudales, corresponde a *Flow* o entrada de flujo, asignando a cada celda que se ubican aguas arriba sobre río Sinú, los valores del hidrograma (Figura 59).



Figura 59. Asignación de entrada de flujo sobre el río Sinú (Sobre cuadro rojo se localiza entrada de flujo).

Se añadió una condición frontera abierta, sobre las celdas que se ubican aguas abajo del río, denominada como *Open BC*, asignándole valores estimados de la elevación de la lámina de agua, que puede presentarse aguas abajo del tramo de estudio, permitiendo la salida del agua de la malla (Figura 60).



Figura 60. Asignación de salida de flujo sobre el río Sinú (Sobre cuadro rojo se localiza salida de flujo).

En el contorno de la malla, se agregan condiciones frontera abierta (*Open BC*) para permitir el flujo del agua, en caso de presentarse inundaciones que alcancen los límites de la malla.

Se asignaron valores constantes asociados al nivel del agua mínimo (0.05 metros) que puede presentarse en zonas inundadas, dejando pasar el agua, en caso de extenderse las manchas de inundación y se alcance el nivel mínimo de agua. La Figura 61 muestra la asignación de las condiciones frontera abierta sobre el

contorno de la malla, representada por una línea roja en los límites de la zona de estudio.

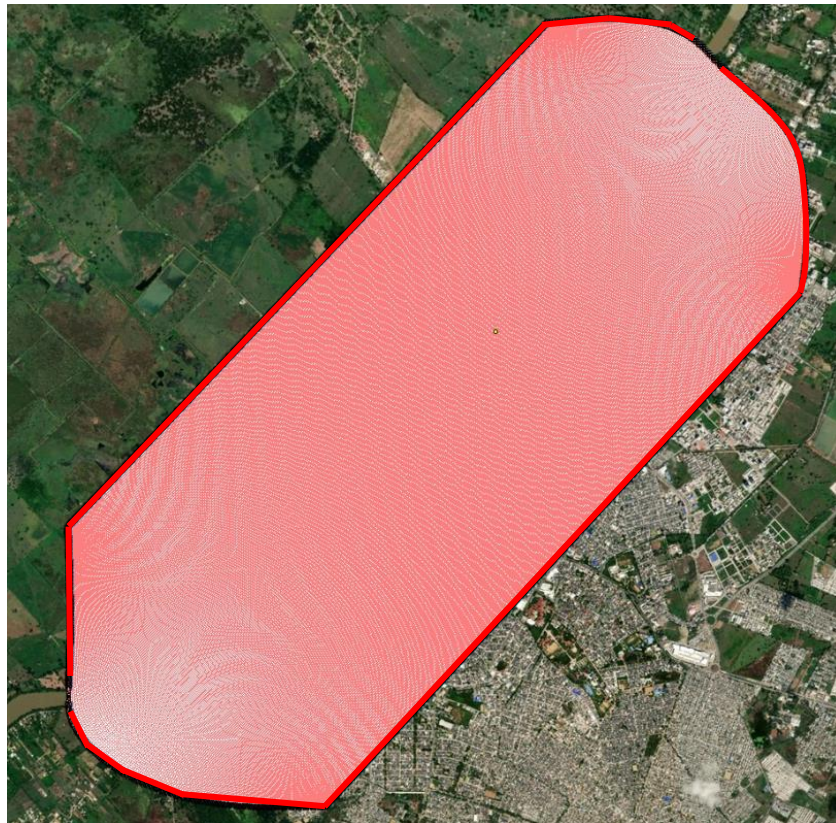


Figura 61. Asignación de condiciones frontera sobre el contorno de la malla.

#### 5.8.4. Tiempo de simulación

El tiempo de simulación se establece en la pestaña *Timing / Linkage*, donde se modifican las fechas de inicio y termino de modelación, los periodos del modelo, la duración de la simulación, la variación del tiempo de cálculo o pasos de cálculo (dT), y se adapta el tiempo de cálculo para cada escenario requerido.

El modelo EFDC Explorer permite asignar un dT dinámico (*Dynamic Time Step*), permitiendo que el programa adapte los pasos de cálculo, de acuerdo con las necesidades del modelo, aumentando o disminuyendo la variación del del tiempo de cálculo, cuando el modelo lo permita.

Para el modelo del río Sinú, se define una variación del tiempo de cálculo (dT) igual a 0.001 segundos, activando el *Dynamic Time Step* permitiendo un tiempo máximo

de cada paso de 5 segundos. El tiempo de simulación varía de acuerdo con las necesidades del modelo, realizándose múltiples simulaciones con diferentes tiempos de modelación.

En la Figura 62 se muestra la interfaz del EFDC Explorer para definir el tiempo de modelado.

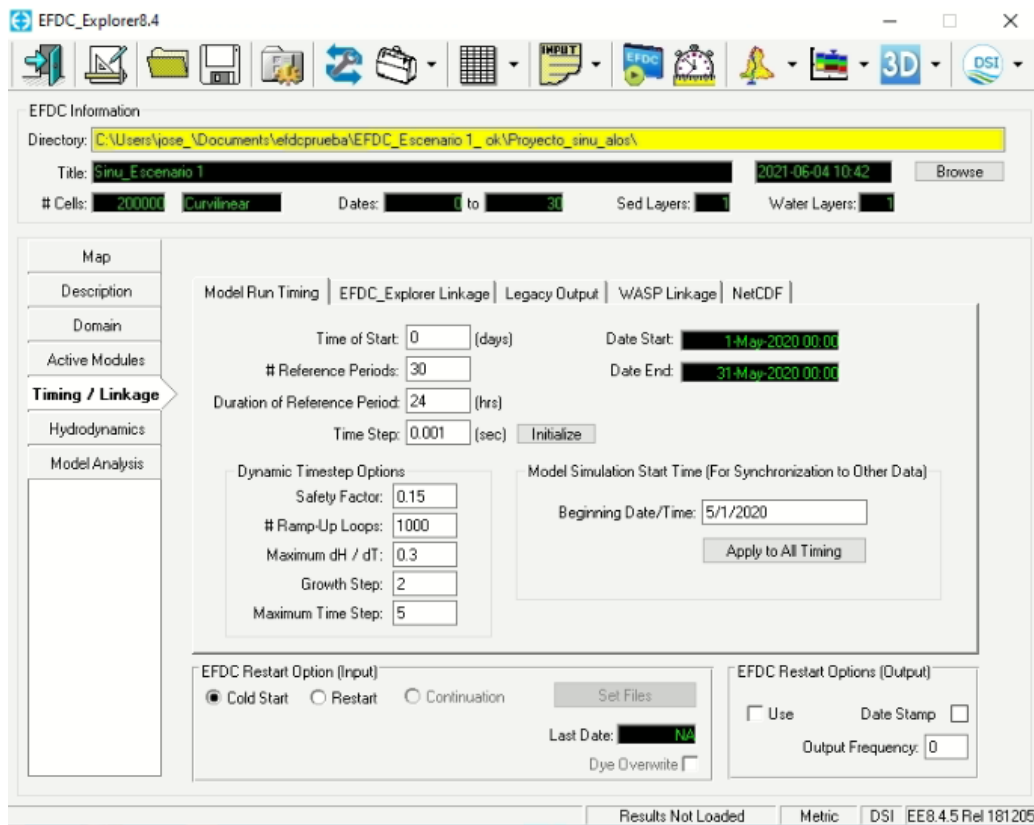


Figura 62. Interfaz del EFDC Explorer para definir el tiempo de simulación.

### 5.8.5. Hidrodinámica

En relación con las características para establecer la hidrodinámica en el modelo, se accede a la pestaña *Hydrodynamics*, que permite modificar opciones de turbulencia, coeficientes de viscosidad, mojado y secado de celdas, condiciones atmosféricas, entre otros.

El modelo del río Sinú se modificaron los valores de turbulencia, asociados con la *Horizontal Eddy Viscosity*, asignando valores menores a 0.15, observando errores en los resultados del modelo con valores de 1.5 o superiores.

Se activaron las opciones de mojado y secado de celdas, definiendo como zona mojada, donde el nivel de agua se encuentre por encima de 0.05 metros, y que zonas secas correspondan, donde haya niveles de agua por debajo de 0.05 metros.

La Figura 63 muestra la interfaz para modificar las opciones de la hidrodinámica del modelo.

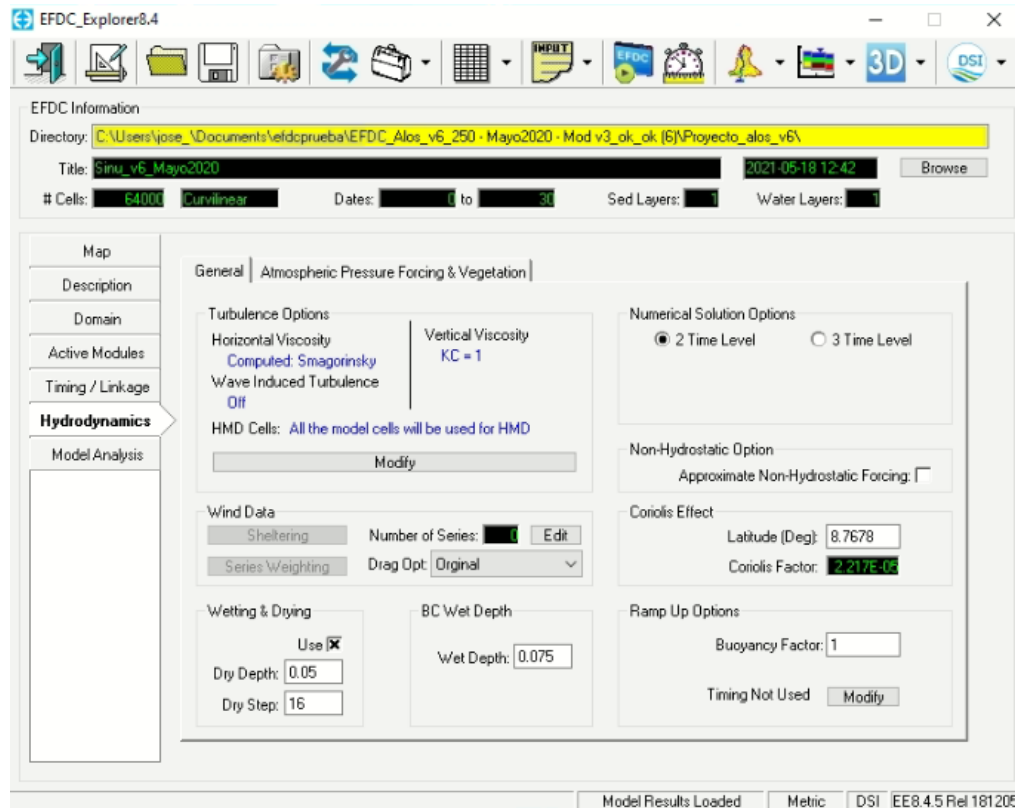


Figura 63. Interfaz de usuario para definir la hidrodinámica del modelo.

Para correr el modelo, se selecciona el icono *Run EFDC*, donde se establecen los núcleos del procesador que serán dedicados para el cálculo, considerando que un mayor número de núcleos dedicados, mayores procesos serán ejecutados, y el tiempo de cálculo puede reducirse. Se define si desean sobrescribirse los datos, la frecuencia de los resultados y se establecen los tiempos de simulación.

Los resultados de la simulación pueden revisarse mientras se va ejecutando el cálculo, mostrando solo los resultados calculados, permitiendo supervisar la simulación, detectar errores en el modelo y revisar resultados parciales.

## 5.9. Calibración del modelo

La calibración es el proceso mediante el cual, se ajustan los parámetros del modelo con el fin de hacer coincidir, tanto como sea posible, los resultados de la simulación con los datos medidos en campo. En otras palabras, la calibración consiste en ajustar el modelo para que reproduzca adecuadamente el sistema que se está modelando en términos hidrodinámicos y/o de calidad de agua (MADS, 2018).

Las primeras calibraciones que se implementaron sobre el modelo corresponden a ajustes en la topobatemetría del río Sinú, debido a los errores que existen entre la batimetría del cauce y la topografía generada a partir de un MDE con resolución de 12.5 metros por píxel, se presentan inconsistencias principalmente en los márgenes del río. Las correcciones a la topobatemetría se realizaron dentro del programa EFDC Explorer, modificando la elevación de las celdas que integran la malla del modelo, ajustando la elevación del suelo a partir de puntos tomados en las campañas de medición, visitas a la zona de estudio, información de Google Earth e información pública sobre sitios colindantes al río Sinú. La figura 64 muestra la topobatemetría del río original, sin considerar correcciones o ajustes sobre el cauce, los márgenes del río o la zona urbana.

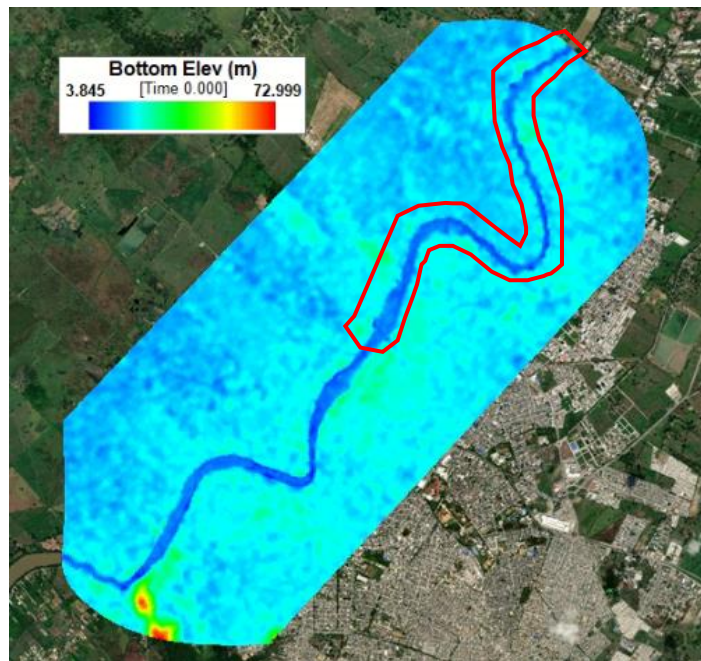


Figura 64. Topobatemetría del río Sinú, sin corrección topobatemétrica.

Una vez realizadas las correcciones a la topobatimetría, se muestra un cauce definido, se eliminan las incongruencias sobre los márgenes del río y se ajusta el modelo para que represente la realidad de la zona de estudio. La figura 65 muestra la topobatimetría del río Sinú, con las correcciones y ajustes al modelo.

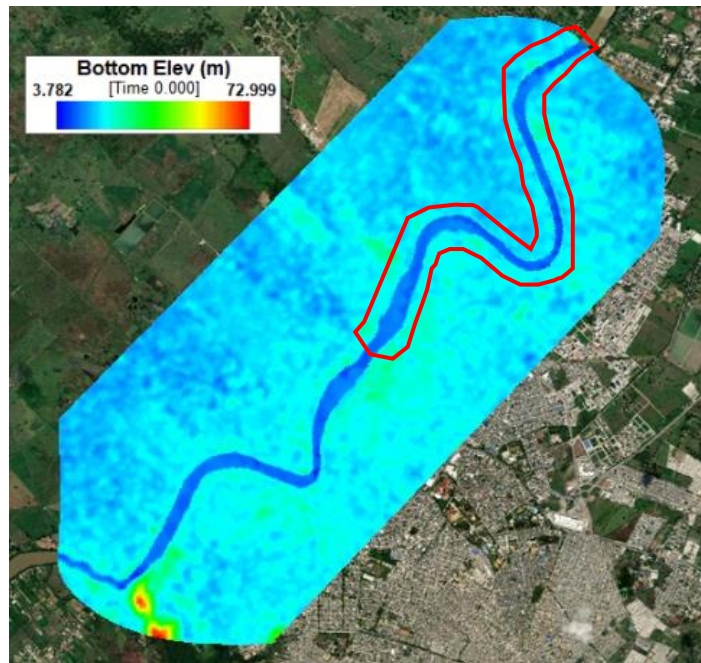


Figura 65. Topobatimetría del río Sinú, con corrección topobatimétrica.

Una vez terminados los ajustes a la topobatimetría, se realiza una calibración de los parámetros del modelo, para ajustar los datos medidos en campos con los datos calculados u obtenidos producto de la simulación.

Se cambian los parámetros del modelo del río Sinú, modificando los valores de turbulencia, asociados con la *Horizontal Eddy Viscosity*, asignando valores menores a 0.15, presentando un ajuste adecuado del comportamiento de flujo.

La calibración puede realizarse directamente sobre el modelo EFDC Explorer, en la pestaña de *Model Analysis*, donde se realiza un análisis temporal de los parámetros del modelo, permitiendo comparar los niveles de agua registrados en campo y los niveles de agua resultado de la simulación, definiendo un punto para comparar los datos.



Para la calibración del río Sinú, se utilizan los caudales medios diarios (CMD) de mayo de 2020, fecha en el que se realizaron las campañas de medición. Se tiene el registro de caudales y niveles de agua para la estación limnigráfica Montería, ubicada bajo el Puente Gustavo Rojas Pinilla (Figura 66), operada por el IDEAM, desde el 1 de mayo al 31 de mayo de 2020. Se logra asociar los CMD con el nivel medio diario (NMD) registrado, buscando comparar los datos registrados en campo con los niveles de agua simulados para el mismo periodo.

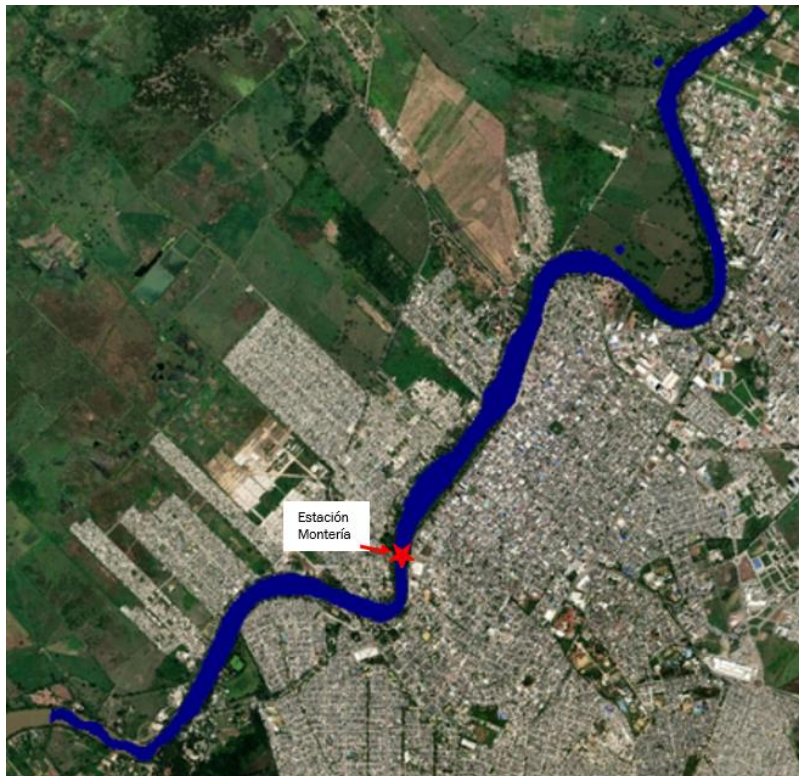


Figura 66. Ubicación de la estación limnigráfica Montería.

Para comparar las series de tiempo de caudales y niveles de agua registrados en la estación Montería, y los resultados de las simulaciones, se ingresa a la opción *Time Series Comparisons*, dentro de la pestaña *Model Analysis*, donde se definen las coordenadas de la estación, así como los códigos de parámetros que se busca comparar, asociados en este caso al *Water Depth*, y se ingresan los registros diarios del nivel de agua en la estación para el mes seleccionado. Se establece el tiempo de análisis para la serie de tiempo y se habilita la visualización de la serie del tiempo.

Al guardar los cambios, es posible visualizar graficas con los NMD registrados en la estación Montería, para el mes de mayo de 2020, información de campo que será utilizada para calibrar el modelo (Figura 67).

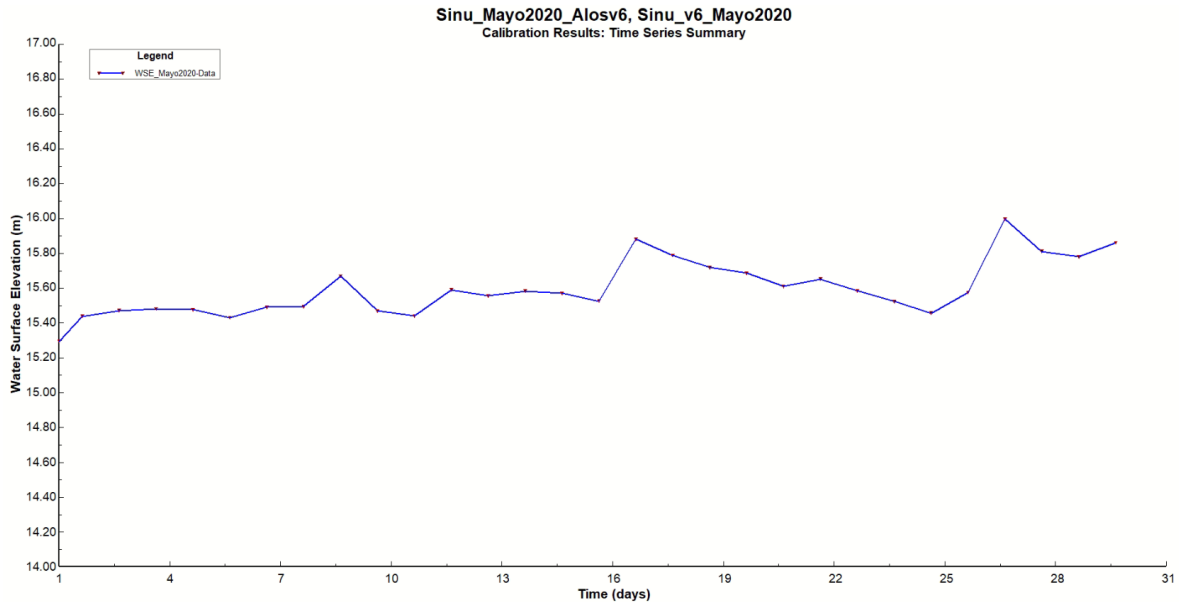


Figura 67. Nivel medio diario registrado en la estación Montería, Mayo 2020.

Se realiza un análisis estadístico de los niveles medios diarios, producto de la calibración del modelo, se calcula la raíz del error cuadrático medio (RMSE), que mide la cantidad de error que hay entre dos conjuntos de datos, y se determina el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe, que establece cuanto de la variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación.

El RMSE se calcula mediante la ecuación:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim} - Q_i)^2}{n}} \quad (5.15)$$

El rango de valores que puede tomar va desde 0 hasta el infinito positivo. El 0 corresponde a un ajuste perfecto mientras que valores más grandes indican un menor ajuste (Cabrera, 2009).

El coeficiente de Nash-Sutcliffe se calcula mediante la ecuación:

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (5.16)$$

Si la simulación es perfecta, E=1; si se intentase ajustar las observaciones con el valor promedio, entonces E=0 (Cabrera, 2009). Algunos valores sugeridos para determinar el ajuste de los modelos, se muestran en la Tabla 31.

Tabla 31. Valores referenciales del Criterio de Nash-Sutcliffe (Molnar, 2011)

E	Ajuste
< 0.2	Insuficiente
0.2 – 0.4	Satisfactorio
0.4 – 0.6	Bueno
0.6 – 0.8	Muy Bueno
> 0.8	Excelente

## 5.10. Validación del modelo

La validación del modelo se refiere al proceso encaminado a establecer que se ha obtenido el modelo correcto, aquella que presenta una adecuada representación del sistema a estudiar.

De acuerdo con Cárdenas (2013), se pueden presentar diferentes formas para validar un modelo:

- Comparando con otros modelos. Los resultados del modelo que se está simulando, se comparan con los resultados de un modelo validado.
- Validación de eventos. Se compara la ocurrencia de eventos en el modelo de simulación y en la realidad, posteriormente se determina si son similares.
- Validación histórica de datos: Si se han recogido datos históricos, se pueden utilizar parte de los datos para construir el modelo (conjunto para modelización), y el resto para determinar si el modelo de simulación se comporta como lo hace el sistema real (conjunto de validación).
- Validación predictiva: El modelo se usa para predecir el comportamiento del sistema, posteriormente se realizan comparaciones entre el comportamiento

del sistema y la predicción realizada por el modelo, para determinar si son los mismos.

- Prueba de Turing: Se pregunta a diferentes expertos si pueden discriminar entre los resultados del sistema y resultados del modelo.

Para el presente proyecto, se realiza una validación a partir de información histórica, analizando el comportamiento del modelo calibrado, conservando los mismos parámetros y condiciones del modelo, modificando únicamente los caudales medios diarios registrados el mes de junio de 2020, buscando que los resultados de la nueva simulación representen de forma adecuada los procesos que ocurren en el sistema estudiado.

De manera adicional, se realiza la validación del modelo mediante la comparación de eventos registrados, comparando la ocurrencia de eventos, durante la temporada de lluvias en agosto de 2021, afectando la zona urbana de Montería dentro de la zona de estudio del presente proyecto.

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de las simulaciones del modelo del río Sinú, permite analizar y comparar el comportamiento del cauce e identificar las características del flujo, desde las condiciones establecidas para la calibración y validación, hasta los escenarios asociados a los caudales estimados para la evaluación del río, ante la presencia de lluvias intensas e identificar las zonas susceptibles a inundarse.

Las simulaciones efectuadas por el modelo para los diferentes escenarios planteados, surgen de la implementación, calibración y validación del modelo EFDC Explorer, que representan la realidad del sitio, y cuyos resultados buscan la predicción de la dinámica del flujo para identificar inundaciones sobre el río Sinú.

### 6.1. Resultados de la calibración del modelo

Se analizan los resultados de la simulación para el mes de mayo de 2020, logrando identificar el nivel del agua sobre el río dentro del modelo, asociado a los caudales medios diarios. Se compararon los niveles de agua medidos en campo (línea azul), respecto a los niveles del agua obtenidos de la simulación (línea roja), encontrando que se ajustan de manera satisfactoria los datos medidos con los simulados, comprobando así, que el modelo se encuentra calibrado (Figura 68).

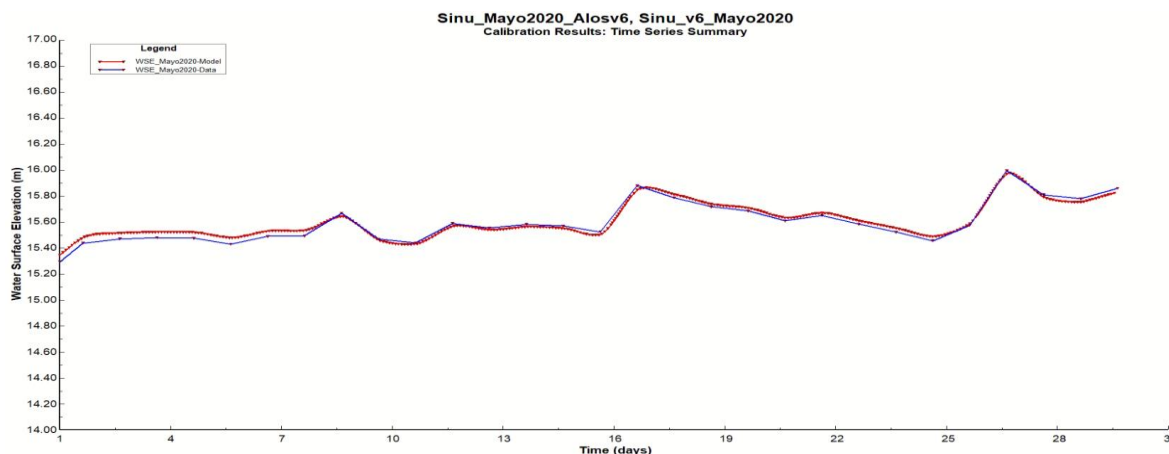


Figura 68. Comparación de nivel medio diario medidos en campo y simulados, Mayo 2020.

Los reportes estadísticos de calibración que analizan los niveles medios diarios, registrados en campo para mayo de 2021 y los niveles de agua identificados sobre

el modelo, presentaron un RMSE de 0.032 y un coeficiente de Nash-Sutcliffe de 0.958, que de acuerdo con los valores de referencia descritos en la Tabla 31, se considera un ajuste excelente, quedando así el modelo calibrado.

## 6.2. Resultados de la validación del modelo

Al modificar la condición frontera asociada a la entrada de flujo del modelo calibrado, utilizando los caudales medios diarios registrados en junio de 2020, se obtuvieron los niveles medios diarios del cauce, asociados a los caudales simulados, logrando comparar los niveles de agua medidos en la estación Montería (línea azul), durante todo el mes de junio de 2020, y los niveles de agua resultado de la nueva simulación (línea roja), encontrando que los resultados ajustan de manera satisfactoria (Figura 69).

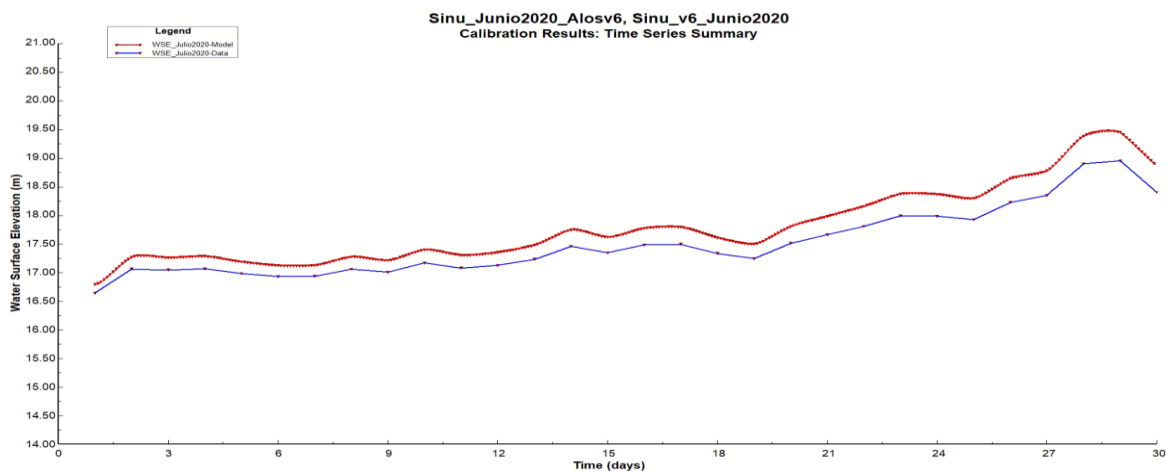


Figura 69. Comparación de nivel medio diario medidos en campo y simulados, junio 2020.

Se realizó un análisis estadístico de la validación, considerando los niveles de agua simulados y registrados en campo, durante junio de 2020, presentando valores del RMSE de 0.30 y un coeficiente de Nash-Sutcliffe de 0.70 que, de acuerdo con los valores de referencia descritos en la Tabla 31, se considera que el modelo tiene un ajuste bueno, y se comprueba que el modelo está validado.

Durante la temporada de lluvias, en agosto de 2021, se presentaron lluvias intensas en el Departamento de Córdoba, Colombia, afectando la zona urbana de Montería, dentro de la zona de estudio del presente proyecto. De acuerdo con GS Noticias

(2021), se presentaron desbordamientos sobre el río Sinú, inundando el Parque Lineal Ronda del Sinú, en el centro de Montería. Por lo anterior, se realizó una segunda validación, comparando la ocurrencia de este evento en el modelo de simulación y la realidad, para determinar si existe similitud en las zonas inundadas. La ubicación del Parque Lineal Ronda del Sinú, donde se presentaron inundaciones producto de la presencia de lluvias, se muestra en la Figura 70. El área marcada en azul muestra la extensión de la inundación registrada en campo. Se integra evidencia fotográfica de las afectaciones sobre el Parque Lineal, en la zona centro de Montería.



*Figura 70. Afectaciones por lluvias intensas en zona urbana de Montería, Colombia, 23 de agosto 2021.*

Para la 23 de agosto de 2021, fecha en que se registraron los desbordamientos sobre el río Sinú, la estación limnigráfica de Montería, registró un caudal medio diario de 893 m<sup>3</sup>/s. Para la validación del modelo, se realizó una simulación manteniendo los parámetros y condiciones del modelo calibrado, agregando a las condiciones de frontera, el caudal registrado en la fecha del desbordamiento. Finalmente, se corrió la simulación para representar las condiciones del evento de

desbordamiento, comparando las zonas de inundación resultado de la simulación y las zonas de inundación registradas en campo.

Los resultados de la simulación para el evento del 23 de agosto de 2021, donde se presentaron desbordamiento sobre el Parque Lineal, ubicado en la zona centro de Montería, Colombia, se muestra en la Figura 71.

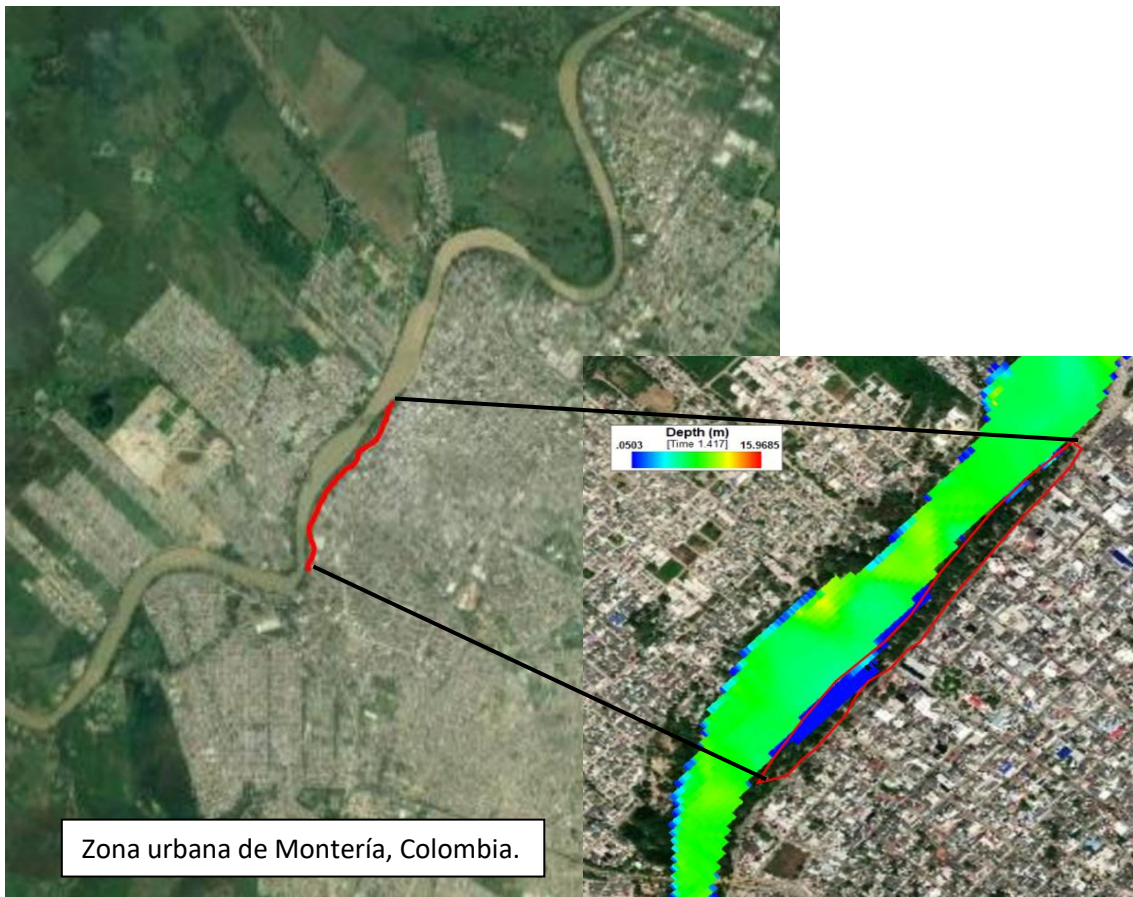


Figura 71. Resultado de simulación para evento de desbordamiento sobre el río Sinú, 23 de agosto de 2021.

Al comparar las zonas de inundación resultado de la simulación con las zonas de inundación registradas en campo, sobre el Parque Lineal Ronda del Sinú, en la zona urbana de Montería, se observó similitud en las zonas inundables durante los eventos ocurridos el 23 de agosto de 2021, y los resultados de la simulación con los caudales registrados para la misma fecha.

A partir de los resultados proporcionados por las simulaciones, queda demostrado que el modelo, está calibrado y validado.



### **6.3. Resultado de simulación del río Sinú**

El modelo EFDC Explorer adaptado al río Sinú, permiten modificar las condiciones de frontera, específicamente el caudal de entrada, estableciendo así, diferentes caudales máximos que pueden presentarse asociados a diferentes periodos de retorno, resultado de escenarios climáticos atípicos sobre la zona de estudio.

Se analiza el comportamiento del cauce, para diferentes caudales asociados a los periodos de retorno de 2, 3, 4, 5 y 10 años, y así, poder observar el comportamiento del cauce, ante la variación del caudal.

Con dicha variación, será posible determinar puntos críticos donde se presenten los primeros desbordamientos, y además visualizar la extensión del agua, sobre las zonas aledañas al cauce en la ciudad de Montería, Colombia.

#### **6.3.1. Simulaciones para un $T_r = 2$ años**

Los resultados de la simulación del río Sinú, permite analizar el comportamiento del cauce con un flujo a  $887.75 \text{ m}^3/\text{s}$ , asociado a un periodo de retorno de 2 años, caudales registrados de manera multianual intermitente, desde el año 2000 hasta el 2021, en la estación limnigráfica de Montería.

Se tiene registro de desbordamientos para caudales de igual magnitud como los descritos en la validación de eventos del capítulo anterior, donde para un flujo de  $893 \text{ m}^3/\text{s}$  se registraron afectación sobre el parque lineal Ronda del Sinú, en la zona centro de la ciudad de Montería.

Los resultados de la simulación para un  $T_r = 2$  años, muestran desbordamientos sobre 5 puntos críticos sobre las colindancias del río Sinú, que se indican en la Figura 72, donde el nivel de agua alcanza una altura de 5 centímetros, sin que esto represente afectaciones a la estructura de vivienda o vialidades.

Las velocidades máximas observadas no superan los  $3 \text{ m/s}$ , conservando una velocidad promedio de  $1.5 \text{ m/s}$  sobre el cauce y velocidades de  $0.1 - 0.3 \text{ m/s}$  sobre la zona de desbordamiento (Figura 73).

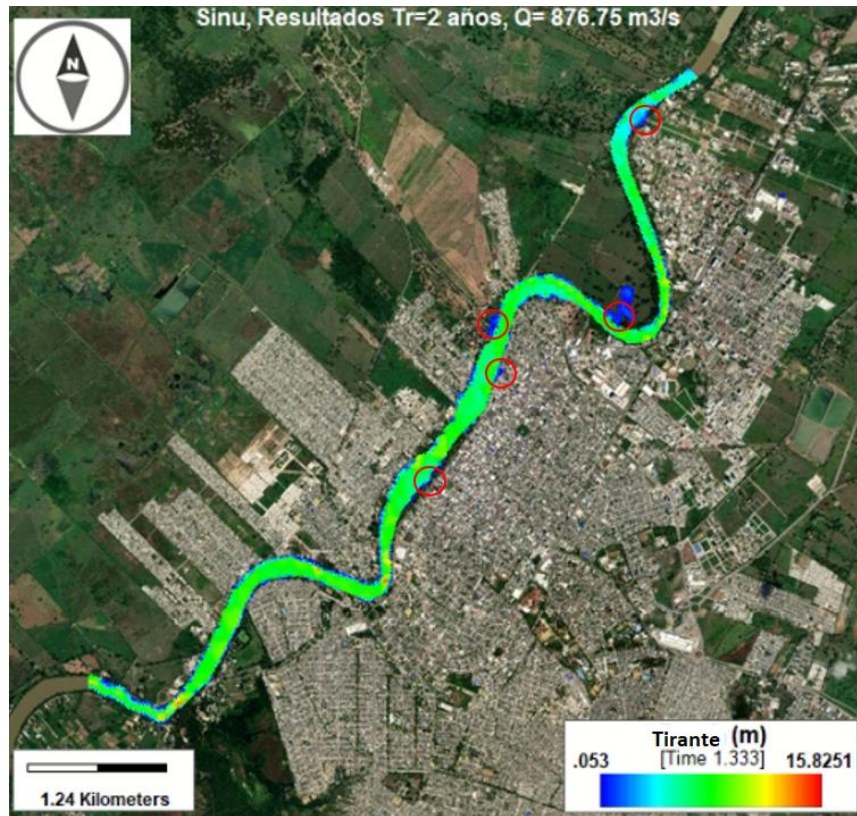


Figura 72. Resultado de simulación del río Sinú, Tr= 2 años, Q= 887.75 m<sup>3</sup>/s.

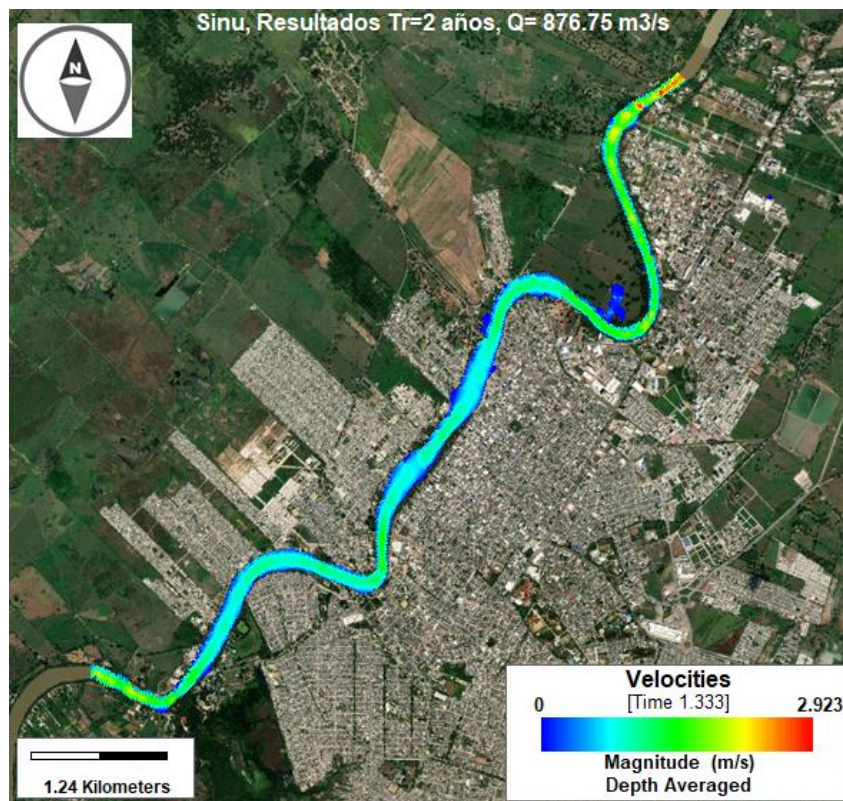


Figura 73. Resultado de velocidades del río Sinú, Tr= 2 años, Q= 887.75 m<sup>3</sup>/s.

### 6.3.2. Simulaciones para un $Tr= 3$ años

Los resultados de la simulación del río Sinú, permite analizar el comportamiento del cauce con un flujo a  $977.93 \text{ m}^3/\text{s}$ , asociado a un periodo de retorno de 3 años, donde caudales máximos de igual magnitud, se presenta en años con presencia del fenómeno de la Niña, que genera lluvias intensas sobre la cuenca del Sinú y en la zona urbana de Montería.

Los resultados de la simulación para un  $Tr= 3$  años, muestran desbordamientos sobre 6 puntos críticos sobre las colindancias del río Sinú (Figura 74), donde el nivel de agua alcanza una altura de 5 - 10 centímetros, extendiéndose los desbordamientos y la altura del agua, comparada con caudales analizados previamente. Los sitios donde se muestra una extensión de la zona de inundación, son el Parque Lineal, Ronda del Sinú, en el centro de la ciudad, y la zona agrícola sobre el meandro del río Sinú, ubicado aguas abajo del Puente Segundo Centenario.

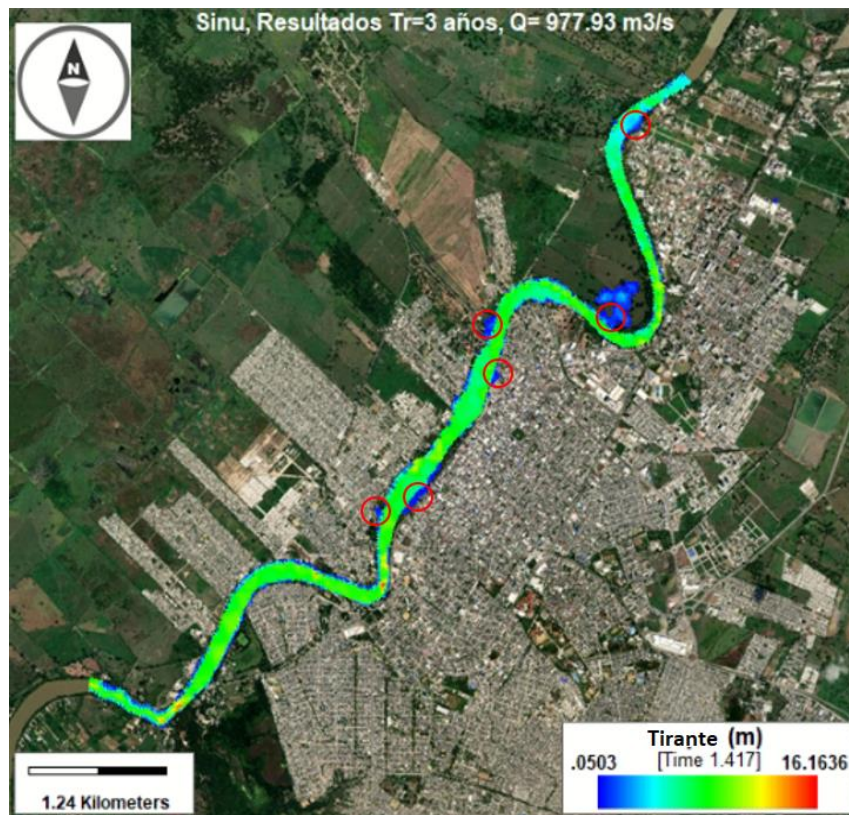


Figura 74. Resultado de simulación del río Sinú,  $Tr= 3$  años,  $Q= 977.93 \text{ m}^3/\text{s}$ .

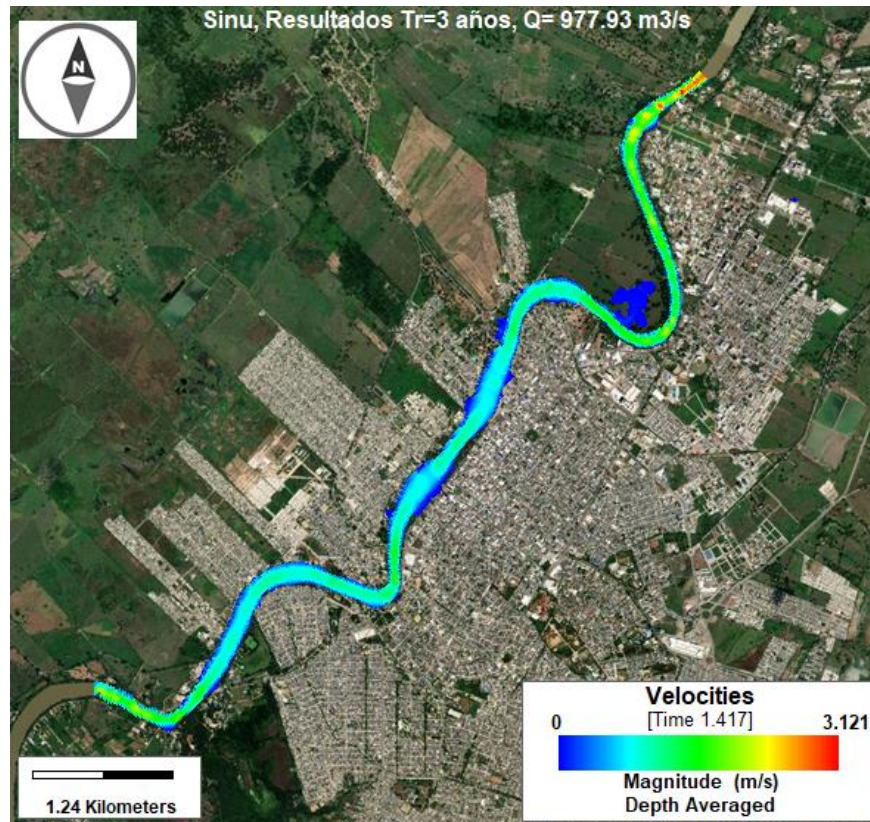


Figura 75. Resultado de velocidades sobre el río Sinú,  $Tr = 3$  años,  $Q = 977.93 \text{ m}^3/\text{s}$

Las velocidades máximas observadas para un  $Tr = 3$  años, no superan los  $3.1 \text{ m/s}$ , conservando una velocidad promedio de  $1.7 \text{ m/s}$  en el cauce, en la zona agrícola urbana se presentan velocidades de  $0.17 \text{ m/s}$ , y dentro del Parque Lineal, Ronda del Sinú, zona centro, presentándose velocidades de  $0.1 \text{ m/s}$  en las partes inundadas (Figura 75).

### 6.3.3. Simulaciones para un $Tr = 4$ años

Los resultados de la simulación del río Sinú, permite analizar el comportamiento del cauce con un flujo a  $1079.12 \text{ m}^3/\text{s}$ , asociado a un periodo de retorno de 4 años, este escenario se puede presentar ante la presencia de lluvias intensas y prolongadas sobre la cuenca.

Los resultados de la simulación para un caudal de  $1079.12 \text{ m}^3/\text{s}$ , muestran desbordamientos sobre 10 puntos críticos sobre las colindancias del río Sinú, donde el nivel de agua alcanza una altura de  $5 - 10$  centímetros sobre la zona urbana y

niveles de agua de 0.5 – 2 metros sobre zona agrícola, presentándose desbordamientos principalmente sobre el margen izquierdo del meandro del río, aguas abajo del Puente Segundo Centenario, extendiéndose las inundaciones hacia la zona de Teran (Figura 76).

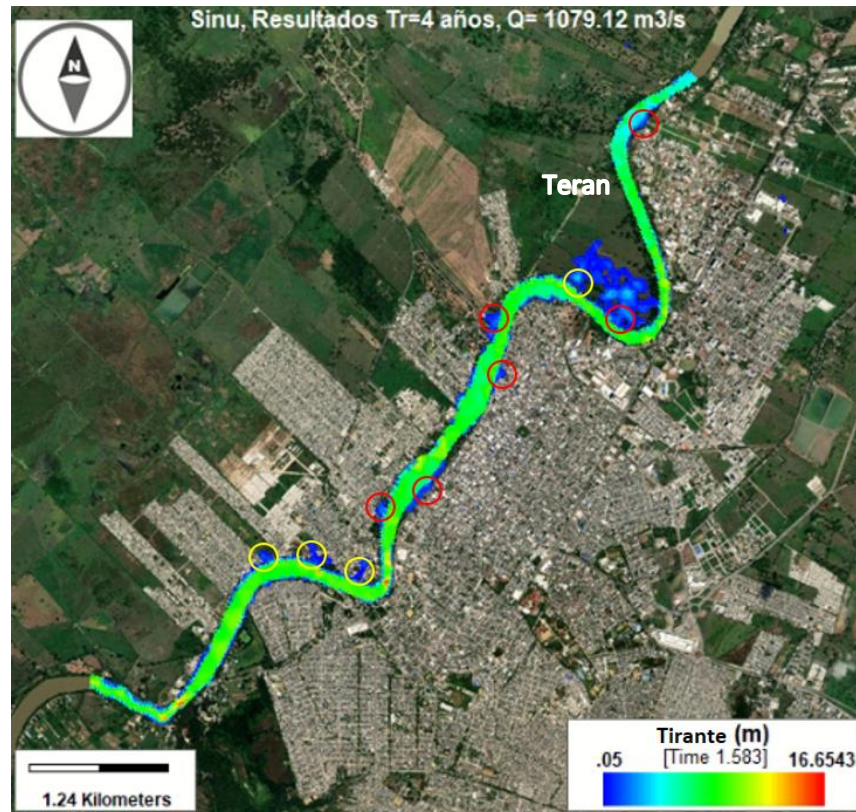


Figura 76. Resultado de simulación del río Sinú,  $Tr= 4$  años,  $Q= 1079.12$  m<sup>3</sup>/s.

Además, se registraron nuevos sitios críticos de desbordamientos (círculos amarillos de la Figura 76), en comparación con el escenario anterior, ubicándose sobre el margen izquierdo del meandro del río, aguas arriba del Puente Gustavo Rojas Pinilla, y aguas abajo del Puente Segundo Centenarios. Los niveles de agua en estos sitios son de 5 a 10 centímetros, observando una tendencia de los desbordamientos a extenderse.

Las velocidades máximas observadas para un  $Tr= 4$  años, no superan los 3.4 m/s, conservando una velocidad promedio de 1.8 m/s en el cauce, en la zona agrícola urbana se presentan velocidades de 0.05 - 1 m/s, dentro del Parque Lineal, Ronda del Sinú, zona centro, presentándose velocidades de hasta 0.2 m/s en las partes

inundadas, y los desbordamientos aguas arriba sobre El Nispero con velocidades de hasta 0.5 m/s (Figura 77).

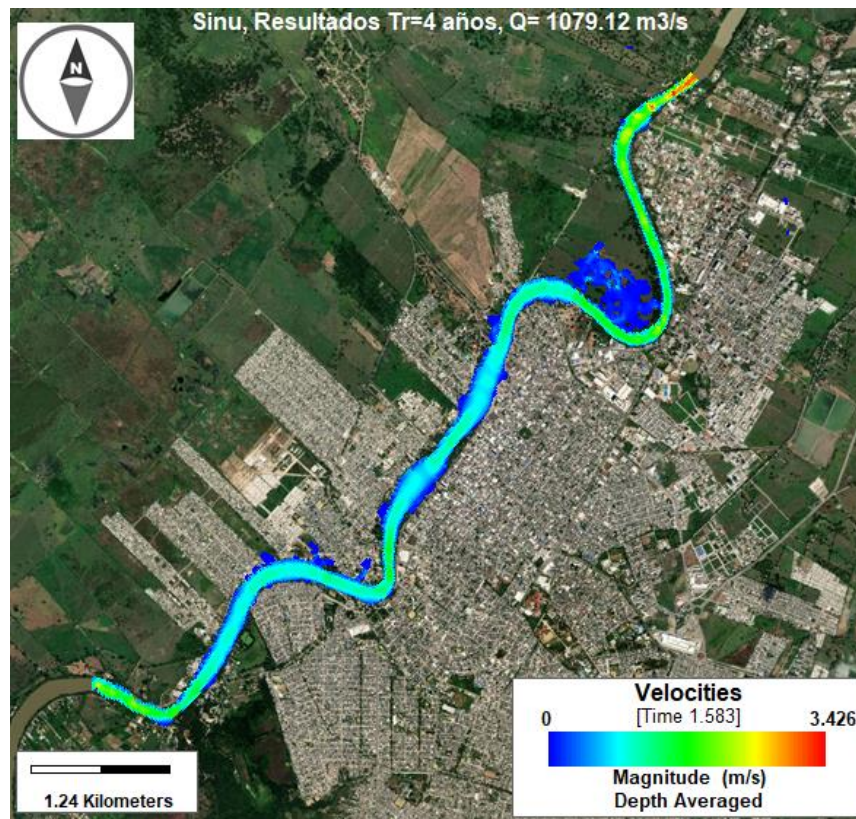


Figura 77. Resultado de velocidades sobre el río Sinú, Tr= 4 años, Q= 1079.12 m<sup>3</sup>/s.

#### 6.3.4. Simulaciones para un Tr= 5 años

Los resultados de la simulación del río Sinú, permite analizar el comportamiento del cauce con un flujo a 1195.98 m<sup>3</sup>/s, asociado a un periodo de retorno de 5 años, este escenario puede presentarse ante el aumento de las precipitaciones producto del cambio climático y fenómenos meteorológicos como La Niña.

Los resultados de la simulación para un Tr= 5 años, permiten identificar los mismos 10 puntos críticos de desbordamiento, ubicados en escenarios anteriores, sobre las colindancias del río Sinú, extendiéndose ahora, las áreas de inundación sobre zonas agrícolas colindantes al río, ejemplo de ello es Teran, y zona urbana de Montería como El Nispero (Figura 78). El nivel de agua sobre dichas áreas de inundación alcanza una altura de hasta 2.8 metros y niveles mínimos registrados en la zona

urbana de hasta 5 centímetros. Las zonas de mayor afectación se ubican sobre el margen izquierdo del río Sinú, donde se extienden las zonas inundables; mientras que, las afectaciones sobre el margen derecho del río se presentan sobre el Parque Lineal, Ronda del Sinú en la zona centro, y la zona de la Universidad de Córdoba colindante al río.

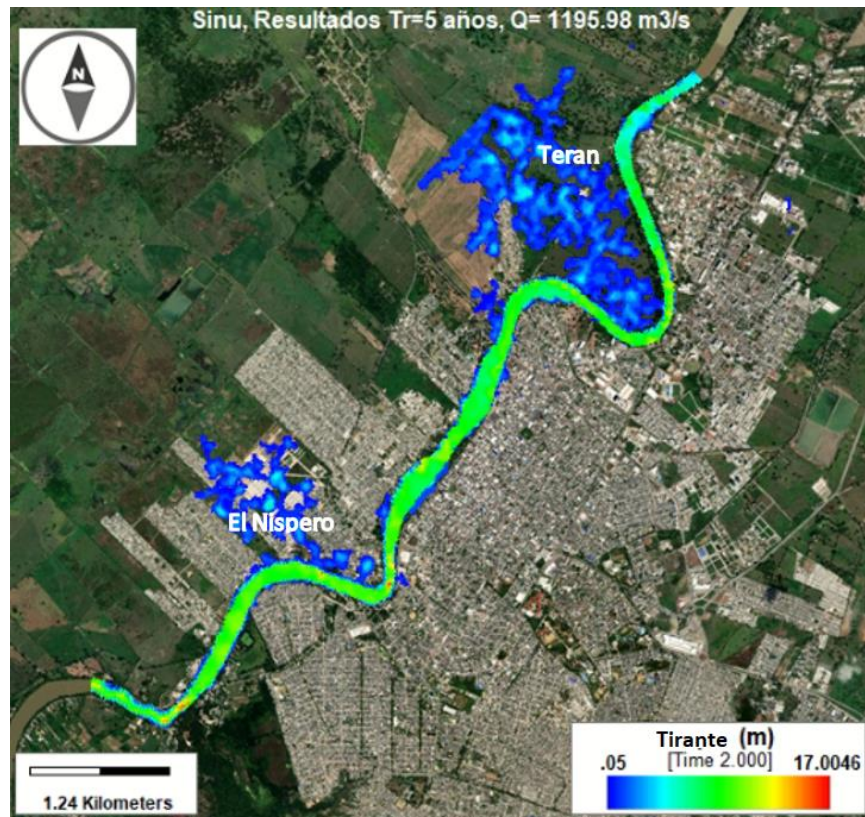


Figura 78. Resultado de simulación del río Sinú, Tr= 5 años, Q= 1195.98 m<sup>3</sup>/s.

Las velocidades máximas observadas para un Tr= 5 años, no superan los 3.56 m/s, conservando una velocidad promedio de 2 m/s en el cauce, en la zona agrícola urbana se presentan velocidades de 0.1 - 1 m/s, dentro del Parque Lineal, Ronda del Sinú, zona centro, presentándose velocidades de hasta 0.27 m/s en las partes inundadas, y los desbordamientos aguas arriba sobre El Nispero con velocidades máximas de 1.2 m/s y mínimas de 0.05 m/s (Figura 79).

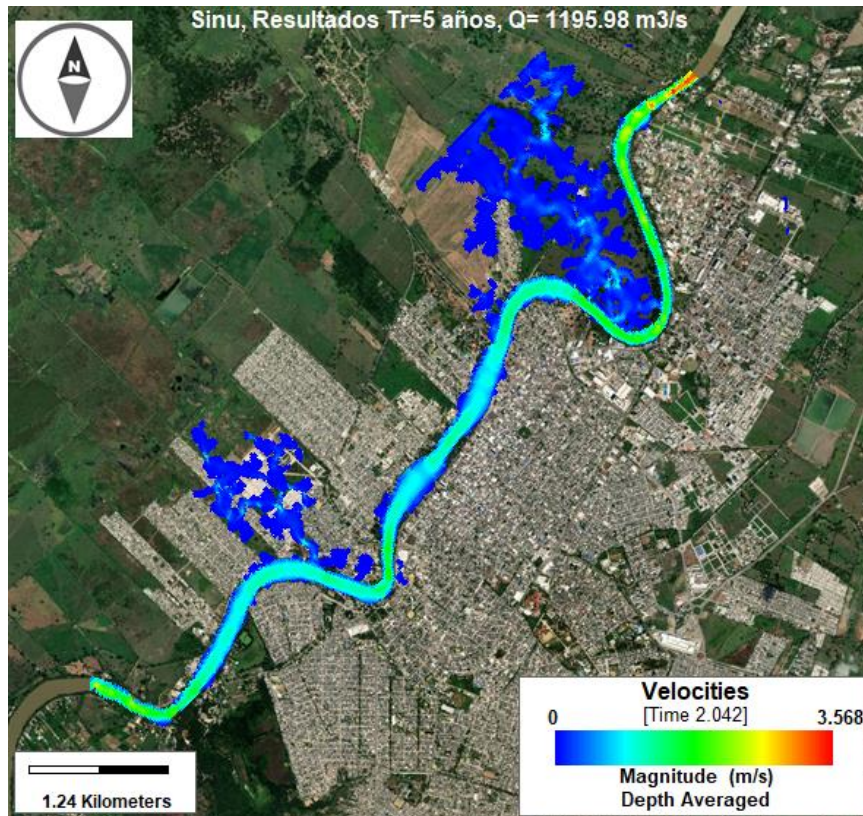


Figura 79. Resultado de velocidades sobre el río Sinú, Tr= 5 años, Q= 1195.98 m<sup>3</sup>/s.

### 6.3.5. Simulaciones para un Tr= 10 años

Los resultados de la simulación del río Sinú, permite analizar el comportamiento del cauce con un flujo a 1398.66 m<sup>3</sup>/s, asociado a un periodo de retorno de 10 años, observando como principal resultado, que el cauce no tiene la capacidad hidráulica suficiente, para poder transitar dicho caudal, y extendiendo la zona inundable hasta los límites de la zona de estudio.

Los resultados de la simulación para un Tr= 10 años, muestran puntos de desbordamientos adicionales sobre el margen derecho (círculos amarillos), aguas arriba del tramo de estudio. Se identificaron zonas de inundación sobre el margen izquierdo del río Sinú, en zonas de El Nispero, Los Colores, y áreas agrícolas como Teran y Monte; mientras que, sobre el margen derecho del río, se presentan desbordamientos sobre las calles 1 al 5 y 10 al 17 colindantes al río, el Parque Lineal, Ronda del Sinú, y la Universidad de Córdoba. El nivel de agua sobre las



áreas de inundación alcanza una altura de hasta 3.6 metros, observando niveles mínimos de hasta 7 centímetros (Figura 80).

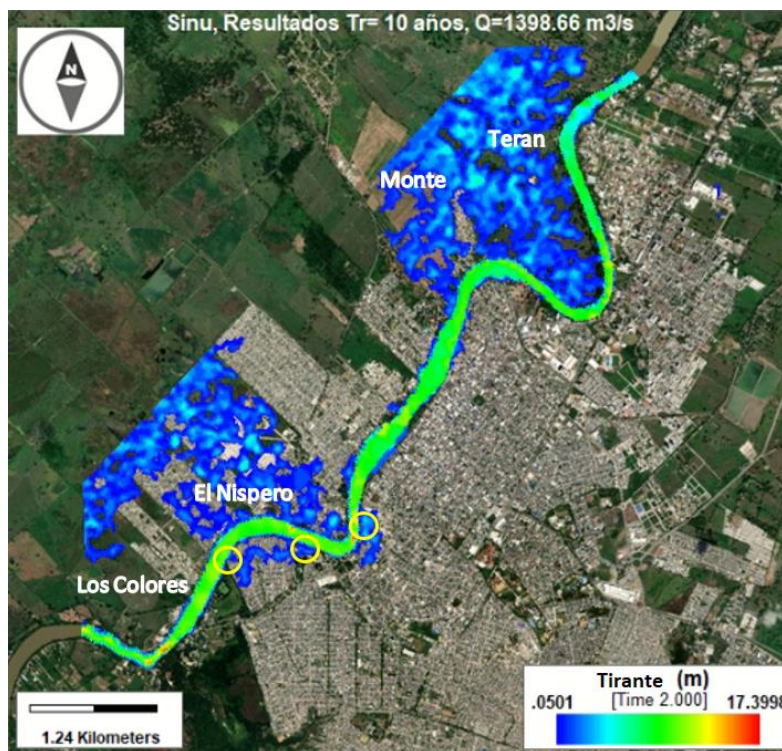


Figura 80. Resultado de simulación del río Sinú, Tr= 10 años, Q= 1398.66 m<sup>3</sup>/s.

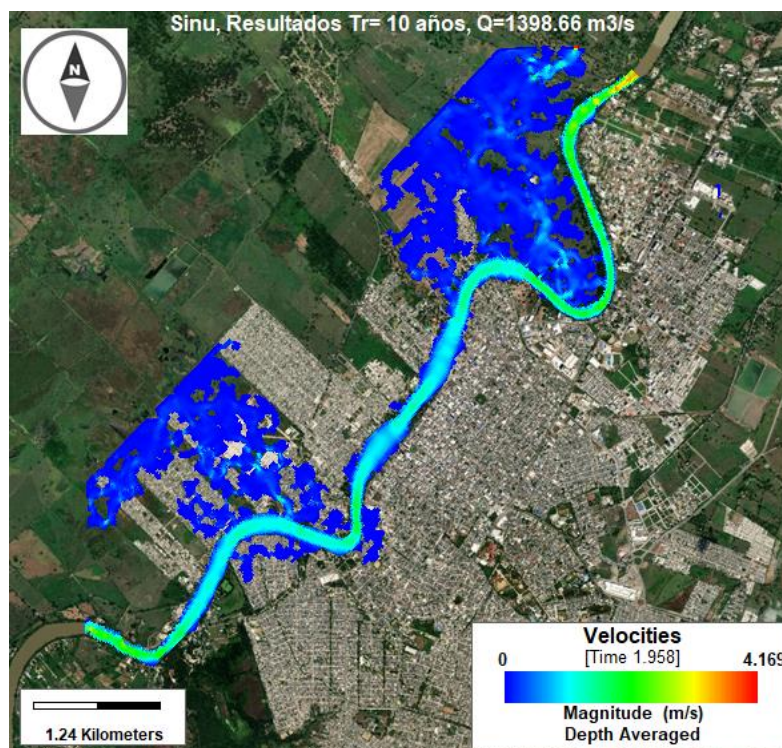


Figura 81. Resultado de velocidades sobre el río Sinú, Tr= 10 años, Q= 1398.66 m<sup>3</sup>/s.

Las velocidades máximas observadas para un  $T_r = 10$  años, no se muestran por arriba de los 4.39 m/s, se conserva una velocidad promedio de 2.35 m/s en el cauce, sobre la zona agrícola urbana se presentan velocidades máximas de 1.3 m/s, sin embargo, predominan las velocidades bajas de 0.05 – 0.2 m/s; dentro del Parque Lineal, Ronda del Sinú, zona centro, predominando velocidades de hasta 0.1 - 0.25 m/s en las partes inundadas; los desbordamientos aguas arriba sobre El Nispero con velocidades máximas de 1.75 m/s y predominando velocidades mínimas de 0.05 m/s; y sobre el margen derecho, aguas arriba del tramo de estudio, identificando velocidades de 0.01 – 0.05 m/s (Figura 81).

#### 6.4. Mapa de zonificación de amenaza por inundación

Los mapas de zonificación de amenaza por inundaciones, son adaptaciones de las mapas de inundaciones asociados a diferentes periodos de retorno, que buscan la planificación territorial, identificando zonas de alto riesgo para la gestión del riesgo en el cambio de uso de suelo dentro de una zona urbana.

El desarrollo de estos mapas utiliza la metodología simplificada planteada por la *Federal Emergency Management Agency* (FEMA), multiplicando el raster de profundidades y velocidades para cada píxel, posteriormente categorizarlos en los distintos niveles de amenaza. La Tabla 32, muestra la categorización en función de la profundidad y velocidad de los desbordamientos.

Tabla 32. Categorización simplificada de la amenaza, metodología de la FEMA.

Nivel de amenaza por inundaciones	Profundidad * Velocidad (m <sup>2</sup> /s)
Bajo	< 0.2
Medio	0.2 – 0.5
Alto	0.5 – 1.5
Muy Alto	1.5 – 2.5
Extremo	> 2.5

Los umbrales de amenaza por inundaciones pueden variar dependiendo del impacto en los humanos, vehículos o edificaciones; el método simplificado de la FEMA, logra implementar eficaz y eficiente, un análisis congruente del nivel de amenaza por inundaciones.

Las Figuras 82 y 83, muestran los resultados de los mapas de zonificación de amenaza de inundación sobre el río Sinú, correspondientes a periodos de retorno de 5 y 10 años, esto debido al alto impacto de los desbordamientos sobre la zona urbanas y agrícola, considerando únicamente la profundidad y velocidad del agua sobre la zona de estudio para determinar los niveles de amenaza.

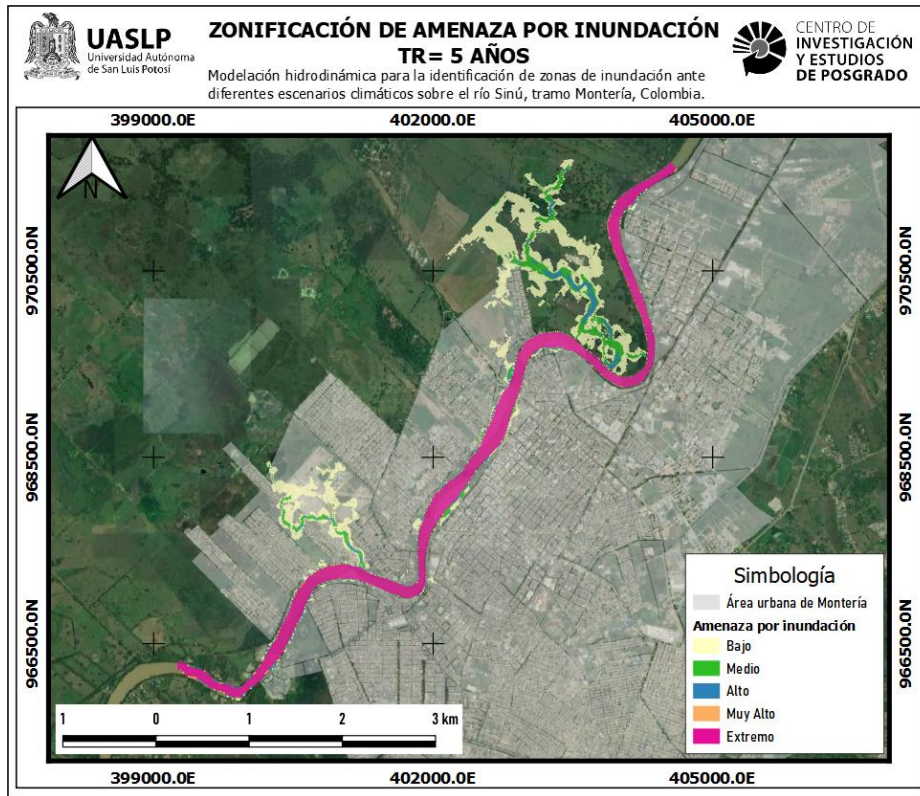


Figura 82. Mapa de zonificación de amenaza por inundación,  $T_r= 5$  años.

El mapa de amenaza de inundación asociado a un  $T_r= 5$  años, muestra un nivel de amenaza predominantemente bajo sobre las colindancias del río, aguas arriba del Puente Gustavo Rojas Pinilla, sobre zonas de El Nispero; se observa un nivel de amenaza bajo - medio sobre el Parque Lineal, Ronda del Sinú, en la zona centro; y un nivel de amenaza medio – alto sobre zona agrícola urbana, ubicada aguas abajo del tramo de estudio, colindante a la zona urbana de Montería, extendiéndose hacia las zonas de Teran (Figura 82).

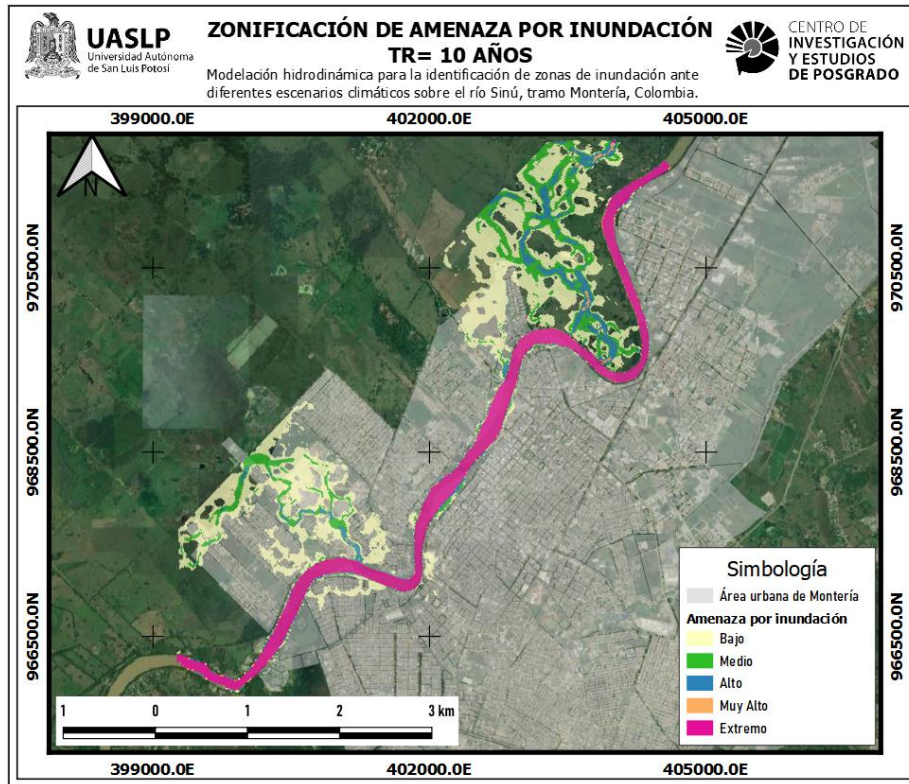


Figura 83. Mapa de zonificación de amenaza por inundación,  $Tr= 10$  años.

El mapa de amenaza de inundación asociado a un  $Tr=10$  años, presenta un nivel de amenaza bajo - medio en zonas de El Nispero, con una mayor extensión de zonas de amenaza bajo sobre ambos márgenes del río, aguas arriba del Puente Gustavo Rojas Pinilla; se observa un nivel de amenaza predominantemente medio sobre el Parque Lineal, Ronda del Sinú, zona centro; y aguas abajo del Puente Segundo Centenario, se identifica un nivel de amenaza medio-alto, sobre la zona agrícola urbana, extendiéndose hasta zonas de Teran y Monte (Figura 83).

## 6.5. Propuestas de solución

Las inundaciones que ocurren en la zona urbana de Montería, Departamento de Córdoba, Colombia, ocasionadas por desbordamientos del río Sinú, se presentan al verse superada la capacidad hidráulica del cauce, producto de lluvias intensas que incrementan el flujo normal del río, la descarga extraordinaria de agua proveniente de la Presa Urrá, y tendencias del clima que incrementan las precipitaciones sobre la cuenca, entre otros.

La prevención de las inundaciones sobre la zona urbana de Montería resulta de interés para su gobierno y población, buscando promover, gestionar y desarrollar estudios para identificar las problemáticas sociales, técnicas y/o ambientales, permitiendo a los tomadores de decisiones establecer y gestionar estrategias de prevención, con el objetivo de dar solución a los desbordamientos del río Sinú.

Para dar solución a los desbordamientos del río Sinú, existen varias opciones que pueden ser implementadas, desde las medidas estructurales, que promueven el aumento en la altura de taludes, desazolve del fondo, protección de márgenes con gaviones, diques, espigones, e infraestructura hidráulica sobre el río para reducir la vulnerabilidad ante la presencia de inundaciones; y medidas no estructurales que integran sistemas de alerta temprana, planes de acción ante la ocurrencia de inundaciones, gestión de cambios de uso de suelos en la zona urbana, entre otros.

Las principales propuestas para reducir la presencia de inundaciones sobre el río Sinú, tramo Montería, es el incremento de la capacidad hidráulica del cauce, a través de trabajos de desazolve del fondo del río, mediante el uso de dragas y equipo especializados para trabajar en cauces amplios con profundidades promedio de 6 metros. Para realizar trabajos de desazolve se requiere de inversiones alta, para la adquisición del equipo, contratación de mano de obra especializada, y el acarreo de material de fondo hasta los sitios de descarga. Es necesario la elaboración de estudios, con topografía a detalle del río para determinar las profundidades de desazolve, y asegurar que los trabajos no aumenten la capacidad hidráulica del cauce. Se debe comprobar el correcto funcionamiento hidráulico del río ante la implementación de las propuestas de desazolve, ya que modificaciones sobre el fondo del río, puede generar un comportamiento irregular en el río y presentar afectaciones aguas abajo del río.

Una de las propuestas, que en este trabajo se proponen, para reducir la presencia de inundaciones sobre la zona urbana de Montería, Colombia, es aumentar el nivel de los taludes marginales del río Sinú, incorporando material poco erosionable sobre los taludes para extender su vida útil, por ejemplo, los gaviones, enrocados o vegetación endémica que pueda desarrollarse sobre el margen del cauce. Se

requiere de estudios de hidráulica fluvial, generando topografía a detalle, integrando las obras de protección marginales propuestas, para evaluar la respuesta del cauce, garantizando el funcionamiento de las obras de protección y la reducción de los desbordamientos (Figura 84). Se recomienda estudiar los ecosistemas ribereños para no afectar directamente a flora y/o fauna endémica, buscando la protección o reubicación de especies.

La construcción de obras de protección marginal requiere de altas inversiones para la ejecución de los trabajos, entonces se recomienda dividir el proyecto por etapas para el elaborar los proyectos de factibilidad, gestionar recursos del gobierno, municipio o particulares, ejecutar los trabajos en temporada de secas y terminar la obras de protección previo a la temporada de lluvias.



Figura 84. Propuestas de obras de protección marginal sobre el río Sinú, tramo Montería, Colombia.

Para complementar las propuestas de solución, se recomienda establecer sistemas de alerta temprana y planes de emergencia, vinculados con estaciones pluviométricas e hidrométricas, servicios de predicción meteorológica, e identificar la tendencia de las precipitaciones, para dar aviso anticipado de posibles amenazas y permitir a las autoridades tomar acción, permitiendo reducir la pérdida de vidas humanas ante la presencia de inundaciones sobre la zona urbana de Montería, Colombia.

## CONCLUSIONES

El análisis de la hidrología e hidráulica de la cuenca del río Sinú, integró la delimitación del área de aportación, las características geomorfológicas de la cuenca, la geomorfología de drenajes, el análisis climatológico mediante el procesamiento de datos de las estaciones pluviométricas del Departamento de Córdoba, Colombia, dando como resultado la estimación de caudales asociados a diferentes periodos retorno. Esta información permitió examinar el comportamiento hidrológico del río Sinú, integrando las características de la cuenca, sus parámetros hidrológicos, las condiciones espacio - temporales, y analizar los desbordamientos sobre el tramo de estudio y sus colindancias.

La topobatimetría se generó al empalmar información topográfica, que contiene datos altimétricos de un MDE con resolución de 12.5 metros por píxel, e información batimétrica, que integra información a detalle del fondo del cauce resultado de las campañas de medición. Se realizó un proceso de interpolación de datos y se obtuvo un MDE corregido, que contiene datos de entrada utilizados en la implementación del modelo numérico del río Sinú. Es posible aumentar la resolución de la topografía mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados, y generar el levantamiento topográfico a detalle del río y la zona urbana de Montería, sin embargo, debido a restricciones de movilidad y limitaciones para realizar actividades de investigación, por la pandemia de COVID-19, no fue posible generar topografía de alta resolución, limitando los alcances del proyecto. Se propone realizar levantamientos topográficos de mayor resolución sobre la zona de estudio, utilizando Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT) para obtener información altimétrica a detalle de la zona urbana y márgenes del río, permitiendo mejorar la visualización de la infraestructura urbana.

En relación con la modelación hidráulica del río, para la predicción de zonas inundables, se implementó un modelo hidrodinámico, que integra datos históricos de precipitación, registros anuales de caudales sobre el tramo de estudio, levantamientos topobatimétricos, y los caudales estimados en el estudio hidrológico de la cuenca Sinú, permitiendo simular el comportamiento del cauce bajo diferentes



escenarios. Se logró calibrar y validar el modelo EFDC Explorer del río Sinú, e identificar áreas inundables, sus niveles de agua y velocidades del agua sobre zonas urbanas y agrícolas.

Los modelos numéricos son herramientas que permiten analizar, entre otras cosas, el comportamiento del flujo de agua sobre cuerpos de agua, y reducir los tiempos en la obtención de resultados hidráulicos de un área de interés, sin embargo, se requiere información de calidad para generar resultados confiables, entender las condiciones reales de un sitio y aplicarlas de manera simplificada al modelo, logrando simular situaciones actuales, escenarios hipotéticos y predecir el comportamiento del flujo. Es posible aplicar estos modelos en diversos casos de estudios, y dar solución a problemáticas actuales en diversas áreas de investigación, donde los resultados son instrumentos que contienen información de calidad para la toma de decisiones, o un apoyo técnico para el análisis de casos particulares.

A través de las simulaciones del modelo EFC Explorer, se identificó la respuesta hidrológica e hidráulica de la cuenca del Sinú, sobre el tramo de estudio, comparando el modelo y la realidad para diferentes caudales sobre el río, logrando predecir el comportamiento del cauce. Se generaron mapas de zonificación de las inundaciones, que muestran la extensión y profundidad de las afectaciones, y mapas de zonificación de amenaza de inundación, que categoriza el nivel de amenaza, en función de la profundidad y velocidad de los desbordamientos.

Los resultados de las simulaciones del modelo hidrodinámico, mostraron el comportamiento del cauce, los puntos críticos donde se presentan desbordamientos, y áreas inundables sobre zona urbana y agrícola. Se analizaron los caudales asociados periodos de retorno de 2, 3, 4, 5 y 10 años, ante la susceptibilidad de perderse la capacidad hidráulica del río Sinú para periodos de retorno pequeños.

En base con los desbordamientos observados en las simulaciones, se determinó que el margen izquierdo colindante a los meandros del río, sobre la zona urbana y periurbana de Montería, tiene mayor susceptibilidad a presentar desbordamientos,

mientras que, el margen derecho del río presenta zonas de inundables de amenaza baja, sin extenderse significativamente sobre la zona urbana.

Se establecieron propuestas de solución para reducir el riesgo de inundaciones, como el desazolve del fondo del río, la construcción y/o adecuación de taludes marginales, el revestimiento de taludes para evitar la erosión, y establecer sistemas de alerta temprana ante el pronóstico de amenaza de inundaciones. Para definir una propuesta de solución sobre el río Sinú, se requieren estudios adicionales de hidráulica, utilizar topografía de mayor resolución, implementar las propuestas planteadas en modelos hidráulicos, y determinar la factibilidad de los proyectos, así como la disponibilidad de acceder a los recursos financieros para financiar las propuestas de solución.

Finalmente, se propone implementar un nuevo modelo hidrodinámico sobre la zona de estudio, que integre información topográfica de mayor resolución, permitiendo crear un modelo que represente con mayor calidad la realidad del sitio y se observe la infraestructura urbana detalle. También, se recomienda generar un análisis de riesgo sobre la zona urbana de Montería, Colombia, donde integren no solo la amenaza de inundaciones, sino que incluya el análisis de vulnerabilidad económica, ambiental y física, ante la presencia de desbordamientos.

## REFERENCIAS

- Aparicio, F. (1992). *Fundamentos de Hidrología de Superficie* (Limusa (ed.); Primera ed). Grupo Noriega.
- Aristizábal, G. L. (2011). Aspectos De La Circulación Atmosférica De Gran Escala Sobre El Noroccidente De Suramérica Asociada Al Ciclo Enos 2009-2010 Y Sus Consecuencias En El Régimen De Precipitación En Colombia. *Ideam*, 20. [http://www.ideam.gov.co/documents/21021/418818/Circulación+Atmosférica+ENOS++2009-2010\\_GloriaLeon.pdf](http://www.ideam.gov.co/documents/21021/418818/Circulación+Atmosférica+ENOS++2009-2010_GloriaLeon.pdf)
- ASF, A. S. F. (2020). *ASF Data Search*. <https://search.asf.alaska.edu/#/>
- Bitrán, D. (1998). *El Fenomeno El Niño: Su Naturaleza y los Riesgos Asociados*. 22. <https://repositorio.cepal.org/>
- Breña, A. F., & Jacobo, M. A. (2006). Principios y fundamentos de la hidrología superficial. *Universidad Autónoma Metropolitana*, 288.
- Broomans, P., Blanes, S., Casas, F., Oteo, J. a., Ros, J., a.I. Delis, Katsaounis, T., Bátkai, A., Sikolya, E., Al-Mohy, A. H., Higham, N. J., Bátkai, A., Sikolya, E., Broomans, P., Delis, A. I., Katsaounis, T., George, D. L., An, I., Obert, R., ... Shnaidman, V. a. (2003). Numerical Accuracy in Solutions of the Shallow Water Equations. *Applied Mathematical Modelling*, 29(2), 754–783. <http://arxiv.org/abs/1105.6372%5Cnhttp://eprints.ma.man.ac.uk/1591/>
- Burgos, V., & Salcedo, A. (2016). Modelos digitales de elevación: Tendencias, correcciones hidrológicas y nuevas fuentes de información. *Instituto Nacional Del Agua - Centro Regional Andino*, October 2014, 16. <http://www.b.ns.ina.gov.ar/ifrh-2014/Eje3/3.10.pdf>
- Cabrera, J. (2009). Calibración de Modelos Hidrológicos. *Imefen.Uni.Edu.Pe*, 1, 1–7. [http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas\\_interes/modhidro\\_2.pdf](http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_2.pdf)
- Campos-Aranda, D. F. (1998). Procesos del ciclo hidrológico. In *Universidad Autónoma de San Luis Potosí*.
- Campos-Aranda, D. F. (2007). *Estimación y aprovechamiento del escurrimiento*

(Primera Ed).

Campos-Aranda, D. F. (2010). Introducción a la Hidrología Urbana. In *Unam* (Vol. 1). <http://www.revista.unam.mx/vol.7/num7/art55/int55.htm>

Campos, A., Holm-Nielsen, N., Díaz, C., Rubiano, D. M., Costa, C. R., Ramírez, F., & Dickson, E. (2012). Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia: un aporte para la construcción de políticas públicas –Bogotá, Colombia. *Banco Mundial*, 436. <http://gestiondelriesgo.gov.co/sigpad/archivos/GESTIONDELRIESGOWEB.pdf>

Cárdenas, J. (2013). *Metodología De Simulación*. 1. [http://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/35447/4/03.METODOLOGIA\\_SIMULACION.pdf](http://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/35447/4/03.METODOLOGIA_SIMULACION.pdf)

Castillo, J., & Espinoza, C. (2005). *Modelo de simulacion para la calidad de agua en un rio*. 1–18.

Ceballos-López, J. D. (2011). Modelación Hidráulica y Morfodinámica de cauces Sinuosos: Aplicación a la Quebrada La Marinilla (Ant). *Boletín de Ciencias de La Tierra*, 30, 107–118.

CENAPRED. (2014). *Características e Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Ocurridos en la República Mexicana en el año 2012* (CENAPRED (ed.)).

CENAPRED. (2021). Sequías. In *Serie Fascículos*. Centro Nacional de Prevención de Desastres.

CENAPRED, C. N. de P. de D. (2012). *Inundaciones* (Primera Ed).

CENAPRED, & IMTA. (2021). *Ciclones tropicales*. Centro Nacional de Prevención de Desastres.

CEPAL/PNUMA, C. E. para A. L. y el C. de las N. U. para el M. A. (2014). *Manual para la evaluación de desastres*. 320.

Chávez, S. (2018). El Concepto de Riesgo. *Recursos Naturales y Sociedad*, 4(1), 32–52. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2018.04.04.01.0003>

- Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1994). Hidrología aplicada. In *Hidrología aplicada*. McGRAW-HILL. <http://bases.bireme.br/cgi-bin/wxislind.exe/iah/online/?IsisScript=iah/iah.xis&src=google&base=REPIDISCA&lang=p&nextAction=lnk&exprSearch=158911&indexSearch=ID%5Cnhttp://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=BINA1.xis&method=post&formato=2&cantidad=>
- CONAGUA. (2011). *Manual para el control de inundaciones* (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (ed.); 2011th ed.). <http://cenca.imta.mx/pdf/manual-para-el-control-de-inundaciones.pdf>
- Corporación Autónoma Regional de Los Valles del Sinú y del San Jorge (CVS). (2018). *Plan de acción para la atención de la temporada de lluvias*. [https://sananterocordoba.micolombiadigital.gov.co/sites/sananterocordoba/content/files/000130/6496\\_plan-de-accion-temporada-lluvias-2018.pdf](https://sananterocordoba.micolombiadigital.gov.co/sites/sananterocordoba/content/files/000130/6496_plan-de-accion-temporada-lluvias-2018.pdf)
- Corporación OSSO y Universidad EAFIT. (2011). *Base de datos de pérdidas históricas en Colombia (período 1970-2011)*.
- Craig, P. M., & Solutions-international, D. (2012). *User ' s Manual for EFDC \_ Explorer7 : A Pre / Post Processor for the Environmental Fluid Dynamics Code. 37933(Rev 00)*.
- Cruz Roja Colombiana. (2000). *Prevención y atención de desastres: Inundaciones*. 34.
- Cruz, S., & Karime, R. (2012). *Gestión Integrada Del Riesgo*. 271.
- CUPREDER, C. U. para la P. de D. R. (2011). Riesgo = Peligro + Vulnerabilidad. *Atlas de Peligros Naturales*, 5–8.
- CVS, C. A. R. de L. V. del S. y del S. J., & FONADE. (2009). *Diagnóstico ambiental de la cuenca hidrográfica del río Sinú* (p. 92).
- Díaz-Pulido, A., Chingaté Hernández, N., Muñoz-Moreno, D., Olaya-González, W., Perilla-Castro, C., Sánchez-Ojeda, F., & Sánchez-González, K. (2009). Desarrollo sostenible y el agua como derecho en Colombia. *Estudios Socio-*

*Juridicos*, 11(1), 84–116.

Díaz, G. (2012). El cambio climático. *Ciencia y Sociedad*, 2, 227–240.  
[http://repositoriobiblioteca.intec.edu.do/bitstream/handle/123456789/1392/CIS\\_O20123702-227-240.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositoriobiblioteca.intec.edu.do/bitstream/handle/123456789/1392/CIS_O20123702-227-240.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Espinoza, M. E. Gutiérrez y T. (2010). Vulnerabilidad y adaptación al cambio climático Diagnóstico inicial, avances, vacíos y potenciales líneas de acción en Mesoamérica. *Milenio*, 22(2), 552.  
[http://www.oxfam.org.uk/resources/policy/climate\\_change/downloads/rr\\_climate\\_change\\_adaptation\\_full\\_sp\\_140510.pdf%5Cnhttp://d2ouvy59p0dg6k.cloudfront.net/downloads/documento\\_bid.pdf](http://www.oxfam.org.uk/resources/policy/climate_change/downloads/rr_climate_change_adaptation_full_sp_140510.pdf%5Cnhttp://d2ouvy59p0dg6k.cloudfront.net/downloads/documento_bid.pdf)

ESRI, E. S. R. I. (2021). *Cómo funciona De topo a ráster—ArcGIS Pro | Documentación*. ArcGIS Pro. <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/tool-reference/3d-analyst/how-topo-to-raster-works.htm>

Euscategui, C., & Hurtado, G. (2011). Análisis del impacto del fenómeno “LA NIÑA” 2010-2011 en la hidroclimatología del país. *II Congreso Internacional Del Clima*, 571, 32. <https://bit.ly/2no145b>

FAO, O. de las N. U. para la A. (2021). *Tormentas : FAO in Emergencies*. FAO. <http://www.fao.org/emergencias/tipos-de-peligros-y-de-emergencias/tormentas/es/>

Farjas, M. (2005). Levantamientos batimétricos. In *L. Topografía* (Vol. 148, pp. 148–162).  
[http://ocw.upm.es/pluginfile.php/399/mod\\_label/intro/Teoria\\_Batimetria\\_Tema\\_13.pdf](http://ocw.upm.es/pluginfile.php/399/mod_label/intro/Teoria_Batimetria_Tema_13.pdf)

Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D., & Alsdorf, D. E. (2007). The shuttle radar topography mission. *Reviews of Geophysics*, 45(2).  
<https://doi.org/10.1029/2005RG000183>

Felicísimo, A. (1994). Modelos digitales del terreno: introducción y aplicaciones a

- las ciencias ambientales. Oviedo: *Universidad de Oviedo*, 118.  
<http://www.etsimo.uniovi.es/~feli>
- Fuentes, J. (2012). Topografía. In E. Durán (Ed.), *Red Tercer Milenio* (2012th ed.).
- García, F. (1994). *Curso básico de topografía* (Árbol Editorial (ed.)).  
[https://www.academia.edu/23340466/Curso\\_Basico\\_de\\_Topografia\\_Fernando\\_Garcia\\_Marquez](https://www.academia.edu/23340466/Curso_Basico_de_Topografia_Fernando_Garcia_Marquez)
- Giraldo, M. (2013). *Lineamiento prácticos para la incorporación del riesgo de desastres en la planificación local* (Primera Ed, Vol. 148). Imprenta La Unión.
- GIS Resources. (2013). *Difference between DEM/DTM and DSM*.  
<http://gisresources.com/confused-dem-dtm-dsm/>
- Hamrick, J. M. (1996). User's manual for the Environmental Fluid Dynamics Computer Code. *Special Reports in Applied Marine Science and Ocean Engineering (SRAMSOE) No. 331*. Virginia Institute of Marine Science, College of William and Mary., 331, 223.  
<https://publish.wm.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2043&context=reports>
- Hervouet, J.-M. (2007). Equations of free surface hydrodynamics. In *Hydrodynamics of Free Surface Flows: Modelling with the finite element method* (p. 341).  
<https://doi.org/10.1002/9780470319628>
- Hidalgo, A., & Martínez-Cantó, R. . (2017). Simulación De Inundaciones Fluviales Con Iber: Validación De Resultados. *Ii Worskhop Iber 2017, May, 2*.  
[https://www.researchgate.net/publication/317064460\\_SIMULACION\\_DE\\_INUNDACIONES\\_FLUVIALES\\_CON\\_IBER\\_VALIDACION\\_DE\\_RESULTADOS](https://www.researchgate.net/publication/317064460_SIMULACION_DE_INUNDACIONES_FLUVIALES_CON_IBER_VALIDACION_DE_RESULTADOS)
- Hutchinson, M., Xu, T., & Stein, J. (2011). Recent Progress in the ANUDEM Elevation Gridding Procedure. *Geomorphometry 2011, January*, 19–22.
- IDE Chile, I. de D. G. (2019). *Disponibles Modelos Digitales de Elevación Regionales de 12.5 metros para la descarga directa*.  
<https://www.ide.cl/index.php/noticias/item/1474-disponibles-modelos-digitales-de-elevacion-regionales-de-12-5-metros-para-la-descarga-directa>

- IDEAM. (2014). *BATIMETRIAS*. <http://www.ideam.gov.co/web/agua/batimetrias>
- IDEAM. (2017). Guía metodológica para la elaboración de mapas de inundación. In *Guía metodológica para la elaboración de mapas de inundación, Colombia*. [http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023774/GUIA\\_METODOLOGICA\\_MAPAS\\_INUNDACION\\_MARZO\\_2018.pdf](http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023774/GUIA_METODOLOGICA_MAPAS_INUNDACION_MARZO_2018.pdf)
- IDEAM. (2018). *Protocolo de Modelacion Hidrológica e Hidráulica*. [http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023833/Protocolo\\_Modelacion\\_HH.pdf](http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023833/Protocolo_Modelacion_HH.pdf)
- IDEAM. (2019). *Estudio Nacional del Agua 2018* (IDEAM (ed.)).
- IDEAM. (2021). *VARIABILIDAD CLIMÁTICA*. <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/variabilidad-climatica>
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, & CANCELLERÍA. (2016). Conocer: El primer paso para adaptarse. Guía básica de conceptos sobre el cambio climático. In *Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático*. <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023631/ABC.pdf>
- IFCR, I. F. of R. C. and R. C. S. (2019). *Definición de peligro*. Base de Datos de Emergencias. <https://www.ifrc.org/es/introduccion/disaster-management/sobre-desastres/definicion--de-peligro/>
- IMTA. (2015). *Términos de referencia para servicios topobatimétricos de vasos de 4 embalses y levantamiento topográfico de la cortina con sus principales estructuras y cauce aguas abajo de 8 presas en los estados de San Luis Potosí y Tamaulipas*. 1–14.
- INECC. (2016). *Variabilidad y Cambio Climático. Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación al Cambio Climático en América Latina y el Caribe*. 1, 144. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/215402/CGACC\\_2016\\_Variabilidad\\_y\\_Cambio\\_Climatico\\_Impactos\\_Vulnerabilidad\\_y\\_Adaptacion.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/215402/CGACC_2016_Variabilidad_y_Cambio_Climatico_Impactos_Vulnerabilidad_y_Adaptacion.pdf)
- INEGI. (2015). *Guía para la interpretación de la cartografía Edafología Escala 1:250 000 Serie III*. 1–60.



- Inifap, I. N. de I. F. A. y P. (2006). *SEQUÍA: Vulnerabilidad, impacto y tecnología para afrontar la en el Norte Centro de México* (Segunda Ed). [http://www.pronacose.gob.mx/pronacose14/Contenido/Documentos/SEQUIA\\_Vulnerabilidad\\_impacto.pdf](http://www.pronacose.gob.mx/pronacose14/Contenido/Documentos/SEQUIA_Vulnerabilidad_impacto.pdf)
- IPCC, G. I. de E. sobre el C. C. (2007). Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. In *Proceedings of the Mediterranean Electrotechnical Conference - MELECON*. <https://doi.org/10.1109/MELCON.2008.4618473>
- Lapaine Miljenko, & Lynn Usery. (2013). *Proyecciones cartograficas y sistemas de referencia*. 1, 67–80. [https://icaci.org/files/documents/wom/09\\_IMY\\_WoM\\_es.pdf](https://icaci.org/files/documents/wom/09_IMY_WoM_es.pdf)
- Lizeth, K., Mellado, C., Ernesto, J., Ibarra, J., & Fonseca, F. R. (2013). Solución numérica de las ecuaciones de Navier-Stokes incompresibles por el método de los volúmenes finitos. *Revista ION*, 26(2), 17–29.
- Luna, A. (2021). *El oscuro panorama por las sequías en México: crisis alimentaria, incendios y muerte*. ALADYE, Asociación Latinoamericana de Desalación y Reúso de Agua. <https://aladyr.net/el-oscuro-panorama-por-las-sequias-en-mexico-crisis-alimentaria-incendios-y-muerte/>
- MADS, M. de A. y D. S. de C. (2018). *Guía Nacional de Modelación del Recurso Hídrico para Aguas Superficiales Continentales*. 39.
- Meza, J. C. (2020). Análisis comparativo de los modelos digitales de elevaciones SRTM y MDE-Ar 2.0 para la identificación de áreas de peligrosidad por inundaciones y anegamientos en un área urbana de llanura. *Geográfica Digital*, 17(33), 44. <https://doi.org/10.30972/geo.17334015>
- Miller, G. (2007). *Desarrollo sostenible, un enfoque integral* (E. I. Thomson (ed.); 8va edición).
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). *Política nacional de cambio climático* (Dirección de Cambio Climático (ed.)). Ministerio de Ambiente y

Desarrollo

Sostenible.

[http://www.minambiente.gov.co/images/cambioclimatico/pdf/Politica\\_Nacional\\_de\\_Cambio\\_Climatico\\_-\\_PNCC/PNCC\\_Políticas\\_Publicas\\_LIBRO\\_Final\\_Web\\_01.pdf](http://www.minambiente.gov.co/images/cambioclimatico/pdf/Politica_Nacional_de_Cambio_Climatico_-_PNCC/PNCC_Políticas_Publicas_LIBRO_Final_Web_01.pdf)

Montealegre, J. (2014). Actualización del componente Meteorológico del modelo institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño y La Niña en Colombia, como insumo para el Atlas Climatológico. *IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales)*, 1–134. <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/440517/Actualizacion+Modelo+Institucional+El+Niño+La+Niña.pdf/02f5e53b-0349-41f1-87e0-5513286d1d1d>

Morán, W. C. (2010). *Hidrología para estudiantes de ingeniería civil* (Pontificia). CONCYTEC.

NOAA, A. N. del O. y la A. de los E. (2013). Ciclones Tropicales. Guía de preparación. *Revista de Aeronautica*. <http://docplayer.es/15191119-Ciclones-tropicales-por-el-meteorologo-lorenzo-garcia-de-pedraza-publicado-en-la-revista-de-aeronautica-no-217-diciembre-de-1958-pp-954-a-963.html>

OEA, O. de los E. A. (1991). Desastres, Planificación y Desarrollo: Manejo de Amenazas Naturales para Reducir los Daños. *Departamento de Desarrollo Regional y Medio Ambiente*, 1–145. <https://www.oas.org/DSD/publications/Unit/oea57s/oea57s.pdf>

OMM. (2014). El Niño/Oscilación del Sur. *Organización Meteorológica Mundial Tiempo-Clima-Agua*, 1, 12. [https://library.wmo.int/doc\\_num.php?explnum\\_id=7889](https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=7889)

ONU, O. de las N. U. (2020). *América Latina y el Caribe: la segunda región más propensa a los desastres | Noticias ONU*. Noticias ONU. <https://news.un.org/es/story/2020/01/1467501>

OPS, O. P. de la S. (2000). Fenómeno El Niño, 1997-1998. In *Series Crónicas de Desastres* (OPS, Vol. 8). <http://www.paho.org>.

Palacios, E., Carrillo, L., Tereshchenko, I., Ortiz Bañuelos, A. D., & Ávalos Cueva,

- D. (2017). Análisis de datos meteorológicos a lo largo de la costa del océano pacífico mexicano (anomalías: parte II). *Ra Ximhai*, 223–242. <https://doi.org/10.35197/rx.13.03.2017.13.ep>
- Pérez, D. (2007). *Introducción a los sensores remotos, aplicaciones en geología*. 09, 45.
- Pinilla H., M., Sánchez, J., Rueda, A., & Pinzón, C. (2012). Variabilidad climática y cambio climático: percepciones y procesos de adaptación espontánea entre campesinos del centro de Santander. *Colombia, Ambiente y Desarrollo*, 2537.
- PNUD, P. de las N. U. para el D. (2012). Conceptos generales sobre gestión del riesgo de desastres y contexto del País experiencias y herramientas de aplicación a nivel regional y local. *Cuadernillos de Gestión Del Riesgo de Desastres a Nivel Regional y Local Conceptos*, 1–28. [https://www.preventionweb.net/files/38050\\_38050conceptosbsicos.pdf](https://www.preventionweb.net/files/38050_38050conceptosbsicos.pdf)
- Posada, C. C. (2007). La adaptación al cambio climático en Colombia Adaptation to Climate Change in Colombia. *Revista de Ingeniería*, 26, 74–80.
- PREDECAN. (2009). *Articulando la gestión del riesgo y la adaptación al cambio climático en en el sector agropecuario: Lineamientos generales para la planificación y la gestión sectorial*. (Primera Ed). Secretaría General de la Comunidad Andina. <http://www.comunidadandina.org/StaticFiles/Temas/AtencionPrevencionDesastres/EJET4ArticulandoGestionRiesgoAdaptacionCambioClimaticoSectorAgropecuario.pdf>
- Rincón, M., Vargas, W., & Gonzáles, C. (2011). Topografía, conceptos y aplicaciones. *Topografía Conceptos Y Aplicaciones*, 121. <https://www.ecoediciones.com/wp-content/uploads/2018/02/Topografía-Conceptos-y-aplicaciones-ebook.pdf>
- Rodríguez-Cuevas, C., Rocha-Escalante, H., Couder-Castañeda, C., Medina, I., & Hernández-Gómez, J. J. (2019). Hydrodynamic-based numerical assessment of flood risk of Tamuín city, Mexico, by Tambaón River: A forecast considering

- climate change. *Water (Switzerland)*, 11(9). <https://doi.org/10.3390/w11091867>
- Rodríguez, O., & Arredondo, H. (2005). *Manual para el manejo y procesamiento de imágenes satelitales obtenidas del sensor remoto MODIS de la NASA, aplicado en estudios de ingeniería civil*. (Issue 3). Pontificia Universidad Javeriana.
- Rojas, M., & Chacón, Y. (2011). *Cuantificación general de emisiones de dióxido de carbono generadas por las actividades en la Universidad Industrial de Santander y propuestas de mitigación*. Universidad Industrial de Santander.
- Rollnic, M. (2009). Batimetría. In *MAI - Monitoramento Ambiental Integrado - Avaliação dos Processos de Erosão Costeira nos Municípios de Paulista, Olinda, Recife e Jaboatão dos Guararapes* (pp. 139–146). <http://naetsicsegundo.webcindario.com/Topografia/Tema5Batimetria.pdf>
- Salas, M. A. (2014). Obras de protección contra inundaciones. In *CENAPRED* (Violeta Ra, Vol. 49). <https://doi.org/10.15749/jts.2016.17.3.007>
- Salas, M. A., & Jiménez, M. (2014). Inundaciones. *CENAPRED*, 3, 53. <http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/3-FASCCULOINUNDACIONES.PDF>
- Santaella, J. (2016). Modelos Digitales de Elevación (MDE). *Instituto Nacional de Estadística y Geográfica*, 1–14. <https://www.inegi.org.mx/contenidos/temas/mapas/relieve/continental/metadatos/mde.pdf>
- Sarría, A. F. (2007). El Modelo Digital de Terreno (MDT). *Sistemas de Información Geográfica*, 127–148. [http://www.um.es/geograf/sigmur/sigpdf/temario\\_7.pdf](http://www.um.es/geograf/sigmur/sigpdf/temario_7.pdf)
- Schweizerische Eidgenossenschaft. (2014). *Gestión Integral del Riesgo*. [https://www.preventionweb.net/files/58288\\_lextnrebotier143165pubcom.pdf](https://www.preventionweb.net/files/58288_lextnrebotier143165pubcom.pdf)
- SEDATU, S. de D. A. T. y U. (2011). *Atlas de Riesgos Naturales para el Municipio de Mazatlán, Sinaloa*.
- SEMARNAT. (2019). *Riesgos hidrometeorológicos, una mirada desde el manejo de cuencas* (Issue July 2020).

- SEMARNAT. (2021). *Informe del Medio Ambiente, Cambio Climático*. Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales. <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/cap5.html#tema2>
- SRTM. (2015). *The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Collection User Guide*. 1–17. [https://lpdaac.usgs.gov/documents/179/SRTM\\_User\\_Guide\\_V3.pdf](https://lpdaac.usgs.gov/documents/179/SRTM_User_Guide_V3.pdf)
- Taylor, M. A. (2015). Why Climate Demands Change. In *The GraceKennedy Foundation Lecture 2015*.
- Tetra Tech. (2007). *The Environmental Fluid Dynamics Code theory and computation volume 1: hydrodynamics and mass transport*. 1(June), 60.
- Torres-bejarano, F. M., Ramirez-leon, H., & Rodelo, R. C. (2015). *La modelación hidrodinámica para la gestión hídrica del embalse del Guájaro, Colombia*. July. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2015.04.001>
- Tucci, C. E. M. (2007). Gestión de Inundaciones Urbanas. *World Meteorological Organization*, 315. <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Gesti?n+de+Inundaciones+Urbanas#1>
- UNESCO. (2019). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019. No dejar a nadie atrás. In *Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura*. <http://www.unwater.org/publications/world-water-development-report-2019/>
- Vargas, P. (2009). El cambio climático y sus efectos en Perú. *Banco Central de Reserva Del Perú*, 14, 59.

## ANEXOS

### A1) Tabla recomendada para la determinación del Número N de la curva de escurrimiento

USO DE TIERRA O CUBIERTA	CONDICIÓN DE LA SUPERFICIE	TIPO DE SUELO			
		A	B	C	D
Bosques (Sembrados y Cultivados)	Ralo, baja transpiración.	45	66	77	83
	Normal, transpiración media.	36	60	73	79
	Espeso o alta transpiración.	25	55	70	77
Caminos	De tierra.	72	82	87	89
	Superficie dura.	74	84	90	92
Bosques Naturales	Muy ralo o baja transpiración.	56	75	86	91
	Ralo, baja transpiración.	46	68	78	84
	Normal, transpiración media.	36	60	70	76
	Espeso, alta transpiración.	26	52	62	69
	Muy espeso, alta transpiración.	15	44	54	61
Descanso (Sin Cultivo) Cultivo de Surco	Surcos Rectos.	77	86	91	94
	Surcos Rectos.	70	80	87	90
	Surcos en curvas de nivel.	67	77	83	87
	Terrazas.	64	73	79	82
Cereales	Surcos Rectos.	64	76	84	88
	Surcos en curvas de nivel.	62	74	82	85
	Terrazas.	60	71	79	82
	Surcos Rectos.	62	75	83	87
Leguminosas (Sembradas con maquinaria o al voleo) o potrero de rotación.	Surcos en curvas de nivel.	60	72	81	84
	Terrazas.	57	70	78	82
	Surcos Rectos.	62	75	83	87
Pastizal	Pobre.	68	79	86	89
	Normal.	49	69	79	84
	Bueno.	39	61	74	80
	Curvas de Nivel, Pobre.	47	67	81	88
	Curvas de Nivel, Normal.	25	59	75	83
	Curvas de Nivel, Bueno.	6	35	70	79
	Normal.	30	58	71	78
Potrero (Permanente) Superficie Impermeable		100	100	100	100

#### CLASIFICACIÓN DE SUELOS

Tipo A: (Esc. mínimo). Incluye gravas y arenas de tamaño medio, limpias y mezclas de ambas.

Tipo B: Incluye arenas finas, limos orgánicos e inorgánicos, mezclas de arena y limo.

Tipo C: Comprende arena muy fina, arcillas de baja plasticidad, mezclas de arena, limo y arcilla.

Tipo D: (Esc. máximo). Incluyendo principalmente arcillas de alta plasticidad, suelos poco profundos con sub- horizontes casi impermeables cerca de la superficie.

**A2) Clasificación hidrológica de los tipos de suelo según su permeabilidad  
(Fuente: FAO)**

Clave de clasificación FAO	Suelos	Tipo hidrológico de suelo	Permeabilidad	Propiedades
T	Andosoles			
Q	Arenosoles			
J	Fluvisoles	A	Muy alta	Arenas con poco limo y arcilla (escurrimiento mínimo)
O	Histosoles			
U	Ranker			
X, Y	Calcisoles (antes xerosol y yermosol)			
I, E	Leptosoles (antes litosoles y rendizinas)	B	Buena	Arenas finas y limos
Z	Solonchaks			
D	Podzoles			
F	Ferralsoles			
R	Regosoles			
H	Feozems			
K	Kastanozems	C	Media	Arenas muy finas, limos y bastante arcilla
N	Nitosoles			
C	Chernozems			
-	Alisoles			
A	Acrisoles			
B	Cambisoles			
G	Gleysoles			
L	Luvisoles			
V	Vertisoles	D	Baja	Arcillas en grandes cantidades, suelos poco profundos con subhorizontes casi impermeables (escurrimiento máximo)
W	Planosoles			
S	Solonetz			
D	Podzoluvisoles			
-	Plintosoles			
-	Lixisoles			